

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Měření a analýza topografie povrchů plastových
produktů ve vztahu k technologii výroby**

**Measurement and Analysis of Surface Topography of
Plastic Products in Relation to Production Technology**

Student:

Bc. Barbora Haluzíková

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Barbora Haluzíková**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: Měření a analýza topografie povrchů plastových produktů ve vztahu k
technologii výroby
Measurement and Analysis of Surface Topography of Plastic Products in
Relation to Production Technology

Zásady pro vypracování:

1. Nastudovat konkrétní podmínky technologie výroby plastových produktů.
2. Analyzovat a vydefinovat vztahy povrchu k technologii výroby.
3. Příprava vzorků z plastických hmot a studium různých způsobů měření topografie povrchu.
4. Změřit topografii povrchů vytvořené sady vzorků.
5. Analyzovat a interpretovat experimentálně získaná data z topografie povrchů vzhledem k technologii.

Seznam doporučené odborné literatury:

BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989. 340 s.
ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pojmy, definice a parametry struktury povrchu*. 1997.
ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1997.
BAYEL, T., L. *Process Optimization of Plastic Injection Molding for Minimal Residual Stress*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
THIRIEZ, A. *An Environmental Analysis of Injection Molding*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2006.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Dr. Ing. Josef Brychta
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě21.5.2010.....

.....Haluzikova.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 21.5.2010


.....
podpis

Adresa trvalého pobytu autora práce: **Barbora Haluzíková**

Trávník 26

750 05 Přerov

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HALUZÍKOVÁ, B. *Měření a analýza topografie povrchů plastových produktů ve vztahu k technologii výroby : diplomová práce*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010, 47 s. Vedoucí práce: Valíček, J.

Diplomová práce se zabývá měřením a analýzou topografií povrchů plastových výlisků optickou metodou. Měření výlisků vytvořených vstřikovací metodou je provedeno na optickém profilometru MicroProf FRT. Důvodem měření je problém s přilnavostí lepidla mezi plastem z materiálu polybutylen tereftalát a plexisklem, díky nové vstřikovací formě. Na základě naměřených dvojrozměrných a trojrozměrných dat je provedeno srovnání topografických parametrů výrobků ze dvou forem, přičemž některé výrobky z druhé formy prošly opalem. Po následné analýze dat je proveden návrh řešení stávajícího problému dané firmy.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

HALUZÍKOVÁ, B. *Measurement and Analysis of Surface Topography of Plastic Products in Relation to Production Technology : Master Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2010, 47 p. Thesis head: Valíček, J.

This thesis deals with the measurement and analysis of the surface topography of plastic moldings by using an optical method. The measurement of this moldings created by an injection method has been carried out by using an optical profilometer FRT MicroProf. The reason for measurement is a problem with the glue adhesion between the plastic material of polybutylen terephthalate and acrylic glass due to a new injection mold. Based on two-dimensional and three-dimensional measured data there is a comparison with the topographic parameters of products from two molds where some products from the second mold have been subjected to flame. After the subsequent data analysis is given a proposal to the solution of the current problem of the company.

Obsah

	strana
Seznam použitého značení.....	8
1 Úvod	10
2 Cíl diplomové práce	11
3 Technologie výroby plastů	12
3.1 Vstřikování.....	12
3.2 Speciální způsoby vstřikování	13
3.2.1 Vícesložkové vstřikování.....	13
3.2.2 Sendvičové vstřikování	14
3.2.3 Vstřikování s plynem (GIT).....	14
3.2.4 Vstřikování s podporou vody (WIT)	14
3.2.5 Vstřikování prášků (PIM)	14
3.3 Vytlačování.....	15
3.4 Vyfukování	15
3.4.1 Vstřikovací vyfukování.....	15
3.4.2 Vytlačovací vyfukování	16
3.4.3 Vyfukování fólií.....	17
3.5 Rotační natavování	18
4 Metody hodnocení topografie povrchu	19
4.1 Rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchů.....	19
4.2 Mechanické metody	19
4.3 Optické metody	21
4.3.1 Optický profilometr MicroProf FRT	21
4.3.2 Konfokální mikroskopie	22
4.3.3 Polarizační mikroskop	24
4.4 Jiné metody	25
4.4.1 Metoda transmisní elektronové mikroskopie TEM	25
4.4.2 Metoda rastrovací elektronové mikroskopie SEM	26
4.4.3 Metoda mikroskopie tunelovacího proudu STM	27
4.4.4 Metoda mikroskopie atomárních sil AFM.....	27
4.4.5 Metoda mikroskopie magnetických sil MFM.....	29
4.5 Normované parametry profilu povrchu	30

5	Experimentální část	33
5.1	Polybutylen tereftalát – PBT.....	34
5.2	Optický profilometr MicroProf FRT	36
5.3	Analýza dat získaných přístrojem MicroProf FRT.....	38
5.3.1	Měření hran.....	38
5.3.2	Komparace 2D a 3D parametrů topografie povrchu.....	43
5.3.3	Diskuze výsledků pro hranu	46
5.3.4	Měření ploch	46
5.3.5	Diskuze výsledků pro plochu.....	54
5.4	Návrh metodiky měření a hodnocení topografie povrchů plastových výlisků	55
	Závěr	56
	Použitá literatura	57

Seznam použitého značení

Seznam použitých zkratk:

CCD	- nábojově vázaný prvek (Charge Coupled Device)
Č	- čočka
N2	- 2. výrobek z nové formy
N3	- 3. výrobek z nové formy
N2opal	- 2. výrobek z nové formy po opalu
N3opal	- 3. výrobek z nové formy po opalu
OV	- optické vlákno
P	- drsnost povrchu
R	- základní profil
S1	- 1. výrobek ze staré formy
S2	- 2. výrobek ze staré formy
W	- vlnitost povrchu
Z	- zdroj
2D	- dvojrozměrný povrch
3D	- trojrozměrný povrch

Seznam použitých symbolů:

A	- amplituda	[mm]
A_s	- výšková nerovnost	[μm]
d	- vzdálenost	[mm]
f	- prostorová frekvence	[mm^{-1}]
i	- pořadový index	[-]
n	- počet měření	[-]
l	- základní délka	[mm]
l_p	- měřená délka	[m]
Ra	- průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
Rq	- střední kvadratická odchylka profilu	[μm]
Rz	- největší výška profilu	[μm]
sRa	- plošná průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
sRq	- plošná střední kvadratická odchylka profilu	[μm]
sRz	- plošná největší výška profilu pro	[μm]
$y(x)$	- funkce popisující profil	[-]
$y(x_i)$	- souřadnice n bodů profilu povrchu v mezích	[-]
$Z(x)$	- výška posuzovaného profilu	[mm]
Z_p	- výška nejvyššího výstupku v rozsahu měřené délky	[μm]
Z_V	- hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu měřené délky	[μm]

1 Úvod

Plasty jsou v dnešní době hodně žádaný artikl. Proto hodně firem nejen v naší republice, ale na celém světě se zabývá její výrobou, distribucí, vývojem i inovací. Plasty se objevují ve všech sférách průmyslu, setkáváme se s nimi v průběhu celého dne. Bez plastu si snad nikdo z nás už ani nedovede představit (každodenní) život.

Firmy v automobilovém průmyslu se zabývají problémy s plasty jako je lesk [1], odlišný odstín barvy, propustnost světla, rozměrová nestabilita [2], topografie povrchu či zlepšení kvality výrobků, a to pomocí vyrovnání průtoku ve vstřikovací komoře [3]. V diplomové práci se budu věnovat problematice přilnavosti lepidla na povrch materiálu PBT a plexiskla u světla do automobilu, z důvodu zavedení nové formy do výroby. Zjistíme topografii povrchu daných vzorků z jednotlivých forem (staré – S1, S2; nové – N2, N3 a nové po opalu – N2 opal, N3 opal). U starých výlisků a nových výlisků po opalu, u kterých problémy nebyly a u nových výlisků, kde byly časté reklamace kvůli odlepení spojených dílů světla. Proto se v této diplomové práci zaměřím na měření topografie povrchu jednotlivých vzorků a na základě porovnání hodnot navrhu efektivní a ekonomické řešení daného problému.

Na vzhled výrobku se v dnešní době klade velký důraz, kvalita výstřiků závisí na různých faktorech, které se účastní vstřikování [4]:

- **FORMA:** materiál formy, struktura formy, vtokový systém, typ vtoku a vtokového ústí, poloha vtoku, vyhazovací systém, chladicí systém, odvzdušnění;
- **PLAST:** tokové vlastnosti, aditiva, obsah a druh plniva, smrštění, modul pružnosti;
- **VÝSTŘÍK:** tloušťka stěny, rovnoměrnost tloušťky stěny, poměr délky toku k tloušťce, úkoso pro vyjímání z formy, zálisky, rozmístění vtoků;
- **TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY:** rychlost vstřikování, bod přepnutí, dotlaková fáze, teplota formy, charakter tlakové křivky;
- **JINÉ:** vstřikovaný polymer, vstřikovací stroj, dodatečné operace, sušení polymeru.

Prvotní kontrolu kvality provádí obsluha vstřikovacího stroje, a to pouze vizuální kontrolou, která není dostatečně objektivní informací o daném výrobku. Vizuální kontrolou lze zjistit vady typu nedostřik, přetok, spálený materiál. Například u probarvení, jemném stříbření a jiných si z takovouto kontrolou nemůžeme být jisti. Při kontrole rozměrů se provádí měření posuvným měřítkem, ale u měkkých plastů nevhodné [4]. Na měření kvality povrchu se nejčastěji používají drsnoměry (dotykové, optické a jiné).

2 Cíl diplomové práce

Cílem diplomové práce je zjistit topografii povrchu plastových výlisků vytvořených vstřikovací metodou pro následný návrh řešení kvůli problémům s přilnavostí plastu z PBT a plexiskla.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analýza současného stavu,
- přehled metod výroby plastových výlisků,
- přehled stávajících metod hodnocení topografie povrchů,
- zhodnocení a rozbor experimentální části,
- návrhy řešení dané problematiky.

3 Technologie výroby plastů

V této kapitole se pojednává o nejznámějších a nejpoužívanějších metodách výroby plastů v současné době. Jako je vstřikování, vytlačování, vyfukování, rotační natavování a jejich další speciální způsoby výroby.

Plasty se v posledních několika desetiletích natolik rozvinuly, že z milionu tun výroby v roce 1939 se zvýšila produkce na 120 milionů tun v roce 1994 [6].

Materiál z nitrátu celulózy byl vynalezen Alexandrem Parkesem a poprvé byl představen na výstavě v Londýně v roce 1862. O několik málo let později, tj. v roce 1868, John Hyatt vynalezl způsob, jak vyrobit kulečnickovou kouli vstříknutím celuloidu do formy a o čtyři roky později s bratrem Izaiášem patentovali vstřikovací stroj. Tento stroj obsahoval píst tlačící plast přes vyhřívaný válec. V roce 1909 Leo Baekeland vynalezl první plně syntetický plast – bakelit. V 50. letech 20. století došlo k masivnímu rozvoji výroby plastů. V roce 1946 postavil James Hendry první šnekový vstřikovací stroj, čímž nahradil píst [5], [6].

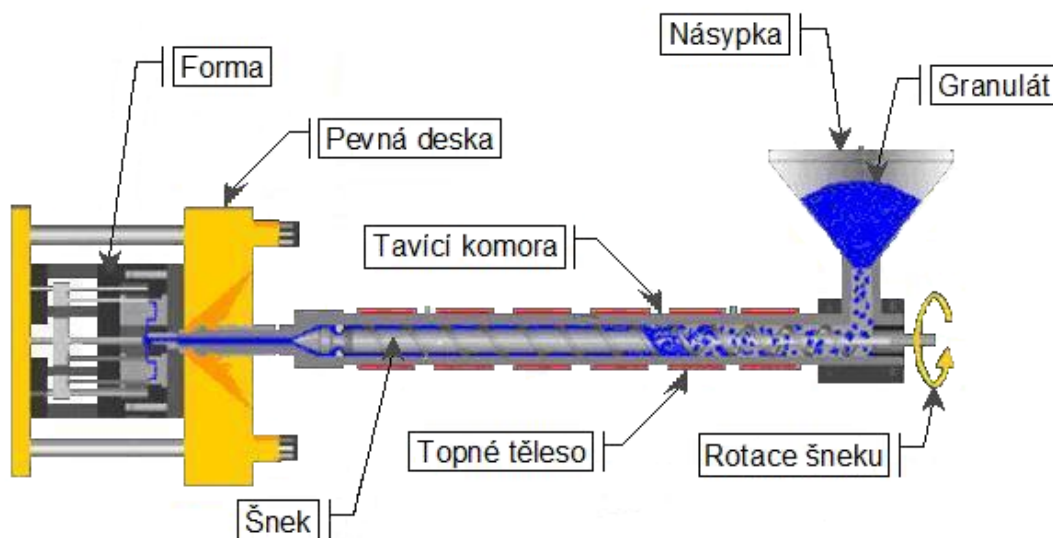
Plasty zčásti nahradily dřevo, papír, kovy, pryž, kůži, sklo, a to díky svým výhodnějším vlastnostem. Jsou lehčí, pevnější, odolnější proti korozi, snadněji zpracovatelné, trvanlivé, mají lepší izolační vlastnosti.

3.1 Vstřikování

V dnešní době se ve strojírenství vyrábí nejvíce plastových výrobků vstřikovací metodou. Protože jsou neustále vyšší požadavky zákazníků, tak doznává předmětná technologie značný vývoj a pokrok. Jde např. o vícekomponentní vstřikování (jeden výrobek z více druhů materiálu), plynem nebo vodou podporované vstřikování (duté díly), mikrovstřikování (miligramové výstřiky), vstřikování strukturně lehčených plastů, vstřikování hybridních dílů z kovů a plastů aj. [7].

Šnek se otáčí a nabírá z násypky přesně určenou dávku granulátu (obr. 3.1), kterou stlačuje a přesunuje ho do tavicí komory. Tam granulát taje a hromadí se před čelem šneku, který se otáčí a ustupuje, aby tavenina měla dostatečný prostor. Po zplastikování daného množství hmoty se otáčivý pohyb šneku zastaví a pohybuje se dopředu velkou rychlostí a vstřikuje taveninu do uzavřené formy, kde hmota ochlazením ztuhne v konečný

výrobek. Potom se forma v dělicí rovině otevře, výrobek se vyjme, forma se uzavře a celý proces se opakuje [8], [9], [10].



Obr. 3.1 Princip vstřikovacího šnekového stroje [9]

3.2 Speciální způsoby vstřikování

Rozvíjí se stále nové vývojové směry progresivní technologie vstřikování díky použití výlisků ze speciálních materiálů, a to od jednoduchých silikonových dílů až po komplexní mikrokomponenty z kovových prášků či keramiky [11].

3.2.1 Vícesložkové vstřikování

Vícesložkové vstřikování umožňuje výrobu výlisků z více než jednoho plastového komponentu v jednom cyklu vstřikovacího procesu. Od klasického vstřikování se liší pouze připojením více vstřikovacích jednotek (dvou, tří, čtyř a vícekomponentní vstřikování) ke vstřikovací formě. U vícesložkového vstřikování se často používá otočná forma či robot pro rychlý průběh pracovního cyklu [11], [12].

V první fázi vstřikování se přes první vstřikovací jednotku vyrobí předběžně vystříknutý díl, poté se forma otevře, přetočí o 180° a zavře. V tu chvíli se předběžně vystříknutý díl nachází v pozici pro konečné vstřikování druhé vstřikovací jednotky (druhá fáze) a dochází ke spojení dílů a následné vyhození výrobku a celý cyklus se opakuje. U tří, čtyř a vícekomponentního vstřikování je princip podobný, jen probíhá více fází a forma se může otáčet o 180°, 120° nebo 90° [11], [12].

3.2.2 Sendvičové vstřikování

Celý proces probíhá ve dvou, resp. třech krocích. Nejprve se do vstřikovací formy vstříkne přesně určené množství hmoty, která tvoří povrchovou vrstvu výstřiku a následně se dostříkne plastový materiál tvořící jádro výlisku. Nakonec se nastříkne první materiál, který vytvoří „vtokovou zátku“, aby materiál jádra nezůstal na povrchu [11], [12].

Jako příklady užití sendvičového vstřikování lze uvést výrobu tvarových dílů s módními akcenty, odpružení koster roštů do postelí, recyklaci materiálů do jader výrobku aj.

3.2.3 Vstřikování s plynem (GIT)

Vlastní proces vstřikování je stejný jako u klasického vstřikování, ale s tím rozdílem že plyn má funkci dotlaku. Jako plyn se používá vysoce čistý dusík (min. 99,8%) s tlakem 10 až 30 MPa. Plyn vytlačí plastické jádro a tím vytvoří dutý prostor. Výhodou je 20-30% úspora materiálu, rychlejší chlazení a tím kratší doba cyklu, rovněž se zmenší smrštění. Využívá se k výrobě výlisků s malou tloušťkou stěny, držadel k nábytku i automobilům, přepravek lahví, palet aj. [11], [12].

3.2.4 Vstřikování s podporou vody (WIT)

Vstřikování s podporou vody je podobné jako u plynu, jen se pro výrobu dutých těles používá voda. Voda se vstřikuje jednou či více pumpami do tekuté taveniny, teplota vody musí být zvolena podle zpracovávaného plastu. Čelo vody působí na plastický materiál jako píst. Voda je následně vytlačena vzduchem, odsáta nebo se vylévá mimo formu a přes zásobník se vrací zpět do oběhu [12].

3.2.5 Vstřikování prášků (PIM)

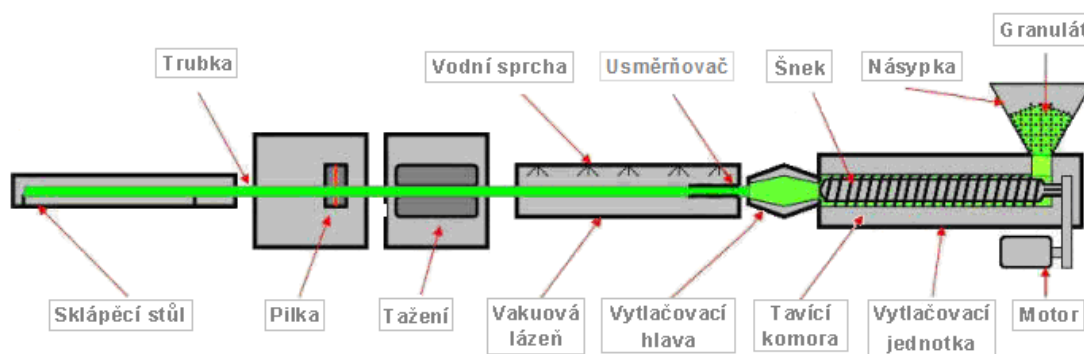
Před samotným procesem vstřikování prášků musí dojít ke smíchání prášku s pojivem a následná granulace směsi. Pak je postup stejný jako při klasickém vstřikování, po ochlazení je výrobek zelený, výrobek se vyjme a přenesení se do pece (teplota 450°C) k vypálení polymeru, výsledkem je hnědý výrobek (s minimálním obsahem plastu).

Následuje spékání kovového nebo keramického prášku v pecích při teplotách (do 2000°C), podle druhu prášku. Výsledné díly jsou homogenní [11], [12].

Základním materiálem (plnivem) pro technologii vstřikování plastů s prášky jsou tvrdé kovy, oceli, karbidy křemíku, oxidy hliníku, porcelán, ale i měď, atd. Tyto prášky se musí smíchat s plastem – pojivem, což je první fáze výroby daného dílu, která končí spékáním [12].

3.3 Vytlačování

Granule přichází pomocí šneku ze zásobníku do tavicí komory (obr. 3.2), kde plastikuje. Plast se v plastickém stavu kontinuálně tváří přes vytlačovací hlavu do požadovaného tvaru, ochlazuje se a tuhne. Poté mohou následovat další případné úpravy výrobku [12], [13].



Obr. 3.2 Princip vytlačování [9]

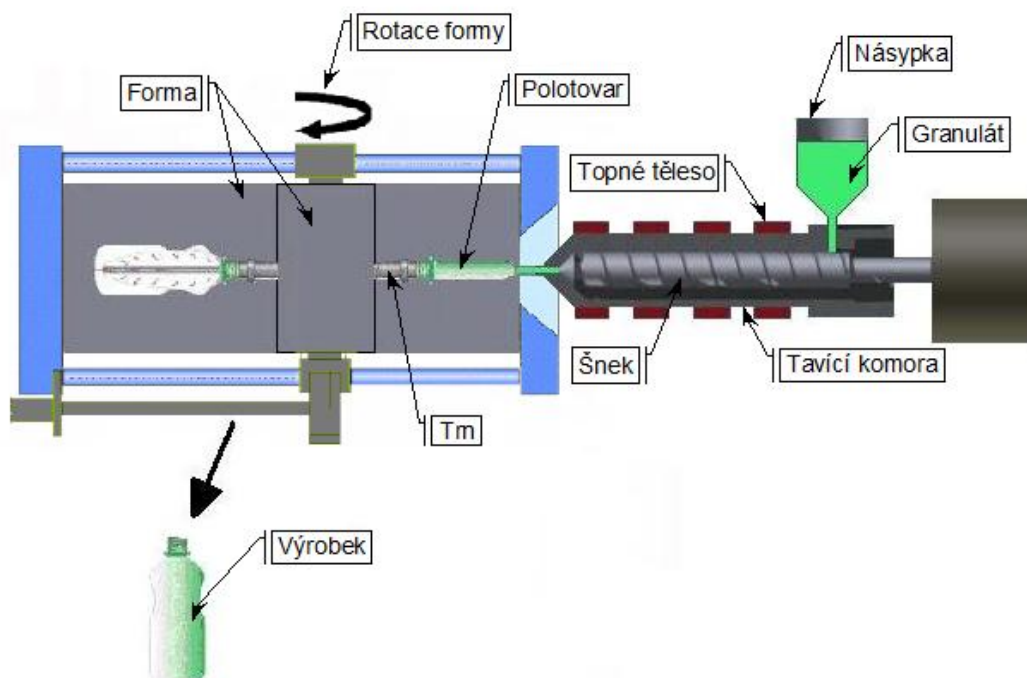
3.4 Vyfukování

Jde o technologii, při které se vhodný polotovar tvaruje ve vyfukovací formě pomocí tlaku vzduchu do požadovaného tvaru. Vyfukování se podle druhu výroby dělí na vytlačovací vyfukování a vstřikovací vyfukování [10], [13].

3.4.1 Vstřikovací vyfukování

Ve vstřikovací formě se nastříkne zplastikovaný plastový granulát na speciálně upravený ocelový trn (obr. 3.3), čímž se vytvoří polotovar se dnem a kompletním hrdlem. Forma se otevře a jedna část formy (s trnem a polotovarem) se otočí a zasune do vyfukovací formy. Následuje vyfouknutí stlačeným vzduchem do tvaru dutiny formy,

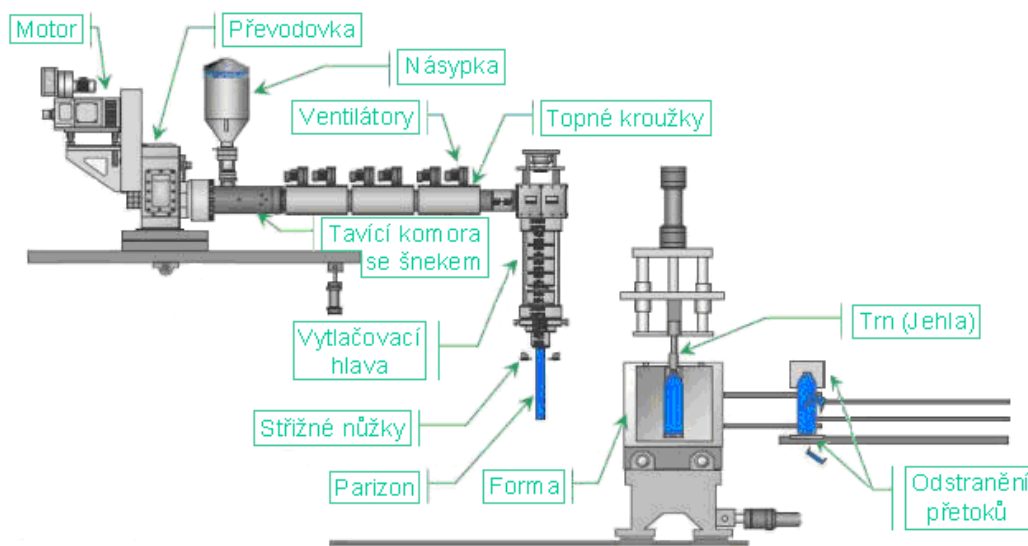
ochladí se a plast ztuhne. Forma se otevře, výrobek se sfoukne stlačeným vzduchem z trnu a celý cyklus se opakuje [9], [12], [13].



Obr. 3.3 Princip vstřikovacího vyfukování

3.4.2 Vytlačovací vyfukování

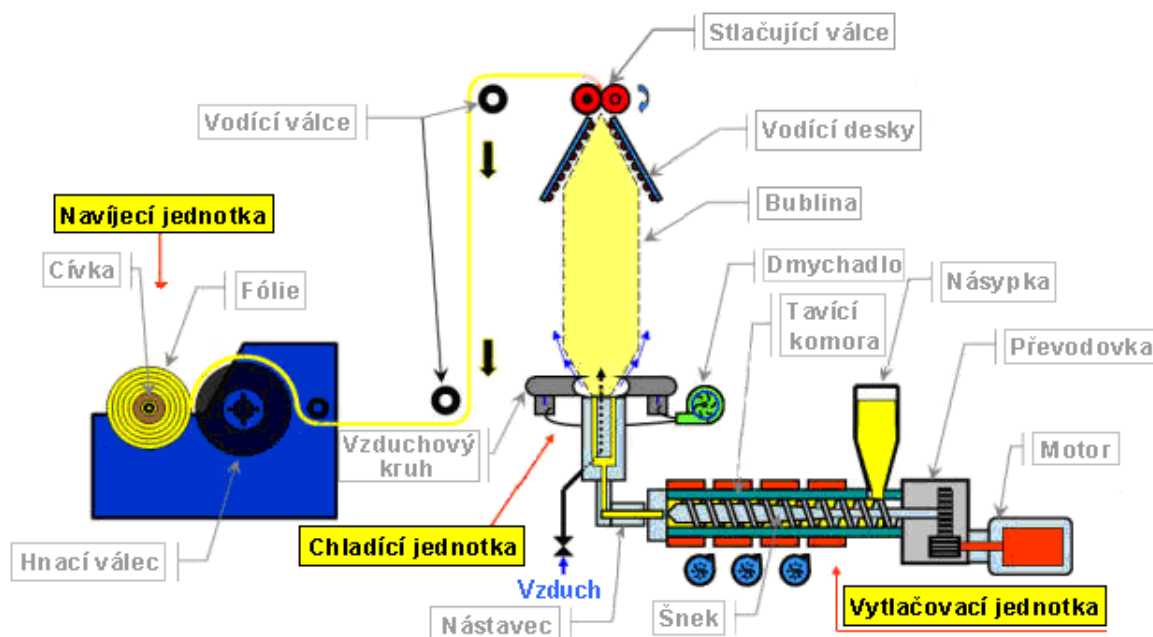
Na vytlačovacím stroji se vytlačovací hlavou vytlačí polotovar – parizon (obr. 3.4). Jakmile dosáhne parizon požadované délky, tak se odstříhne. Střížné nůžky parizon podrží než přijede vyfukovací forma nebo jej přeneseme do formy, kde je nasazen na trn nebo jehlu. Zavřením formy dojde k vytvoření hrdla a ke svaření dna. Následuje vyfouknutí stlačeným vzduchem do tvaru dutiny formy, ochladí se a ztuhne. Poté se výrobek sfoukne a odstraní se přetoky od svarových ploch [9], [12], [14].



Obr. 3.4 Princip vytlačovacího vyfukování [9]

3.4.3 Vyfukování fólií

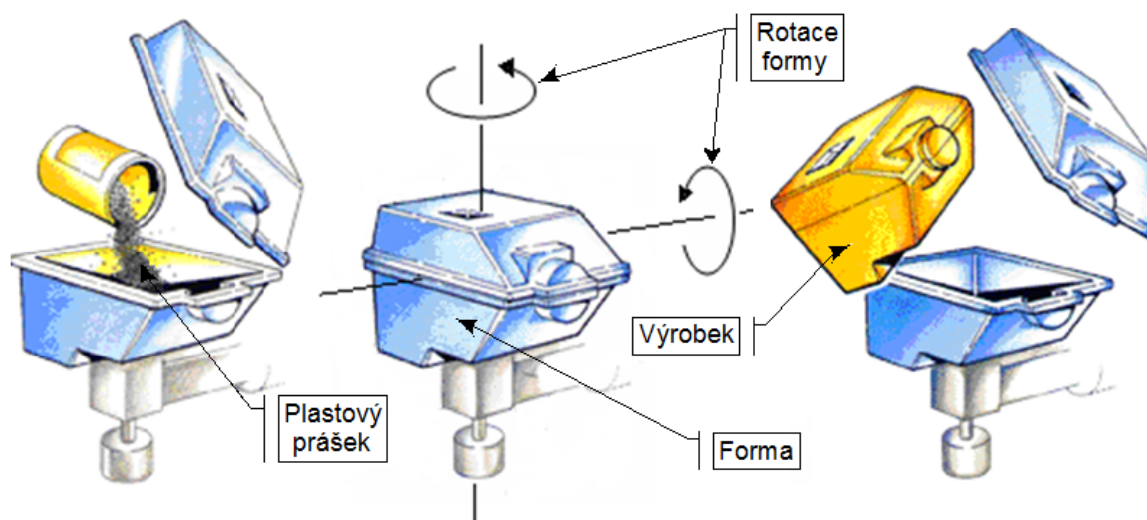
Z vytlačovací hlavy vychází ohřátá měkká tenkostěnná trubka (obr. 3.5). Do vytlačovací hlavy vyústí trubice napojená na zdroj tlakového vzduchu. Stlačený vzduch vyfukuje trubku do tvaru neuzavřeného pytle (bubliny), jehož šířka je omezena kalibračním zařízením. Bublina se v prostoru proudem vzduchu ochlazuje a tuhne a přes soustavu válečků se navíjí do role. Po celou výrobní sérii musí být udržován konstantní tlak vzduchu [9], [10].



Obr. 3.5 Princip vyfukování fólií [9]

3.5 Rotační natavování

Plastový prášek se nasype v přesně odměřeném množství do formy (obr. 3.6), kde je gravitací, teplým vzduchem ($260 - 450^{\circ}\text{C}$, podle teploty tání daného plastu), tvarem formy a pomalým otáčením ($12 \text{ až } 40 \text{ ot.min}^{-1}$) přetvářen na dutý výrobek (tloušťka stěny $1,5 - 30 \text{ mm}$). Po dokonalém protavení a spečení prášku se forma přesune do chladicí komory, kde se ochlazuje. Podle velikosti výrobků a tloušťky stěny trvá pracovní cyklus několik minut až hodin [9], [12].



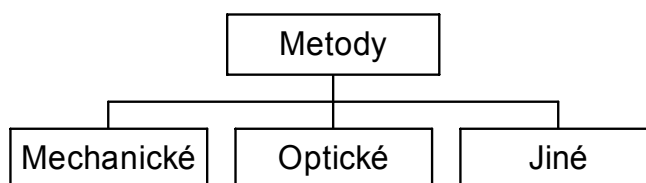
Obr. 3.6 Princip rotačního natavování [15]

4 Metody hodnocení topografie povrchu

V této kapitole je vytvořena zjednodušená klasifikace měřicích metod z hlediska jejich principu měření a následných hodnocení jejich výhod a nevýhod. Zaměřuji se spíše na optické a jiné metody oproti mechanickým.

4.1 Rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchů

Od roku 1930, kdy byly vyvinuty přístroje pro měření topografie povrchu, byl zaznamenán velký pokrok jak v metodách, tak i v zařízeních pro měření. Výrazným pokrokem bylo uplatnění digitálních metod v 60.tých letech, které také znamenaly možnost hodnocení povrchu metodou 3D. Základní dělení metod hodnocení topografie je na obr. 4.1 [16].



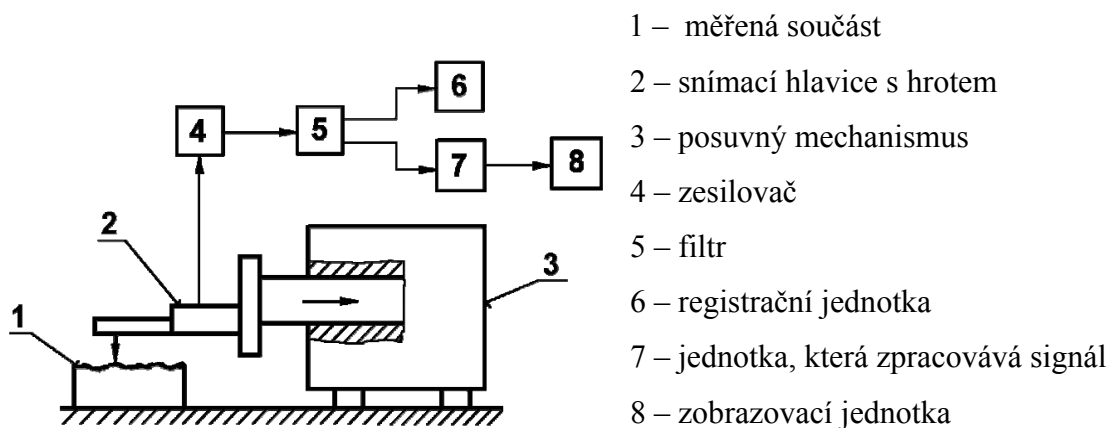
Obr. 4.1 Dělení metod pro hodnocení topografie povrchu [17]

4.2 Mechanické metody

Mechanické (dotykové) metody jsou doposud nejrozšířenějšími metodami zejména ve strojírenské praxi. Lze jimi převádět analogový záznam do digitální formy a také lze naměřené hodnoty použít jako vztažné a srovnávací hodnoty pro jiné metody měření. Výhodou je schopnost zobrazit měřený geometrický profil opakovaně identicky. U plastů se někdy dotykové měřicí metody vylučují z důvodu velkých rozměrů snímacích prvků a příliš velkých snímacích sil, proto je optické měření často jediná možná cesta ke kontrole rozměrů [18], [19], [20], [21].

V dnešní době firmy požadují rychlou kontrolu kvality, nejlépe přímo v automatizovaném výrobním procesu, a to lze zatím pouze bezkontaktně. Tento požadavek nemůže být splněn u doposud používaných mechanických systémů [22].

Dotykový profilometr (obr. 4.2) se skládá ze dvou částí, a to z mechanické a z elektrické. Základním principem je, že změna polohy měřícího hrotu převádí snímač na analogové změny elektrického napětí [18], [20], [23].



Obr. 4.2 Schéma dotykového profilometru [20]

Zhodnocení výhod a nevýhod mechanické metody měření topografie povrchu je uvedeno v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Výhody a nevýhody mechanických metod [24]

Výhody dotykových přístrojů	Nevýhody dotykových přístrojů
- měřitelnost strojírenských povrchů	- destrukce povrchů u měkkých materiálů
- velká rozlišovací schopnost	- pouze 2D měření
- přímé měření parametrů topografie povrchu	- relativně pomalý pohyb hrotu po měřeném povrchu
- možná kalibrace výsledků z nepřímých metod vzhledem k přímému měření	- chybějící kontinuální kontrola a řízení kvality povrchu
- nevadí zbytky materiálu a olejového filmu na povrchu	- nemožnost dálkového řízení
- jednoznačně definované ISO standardy a povrchy	- nadměrná selektivnost získaných informací

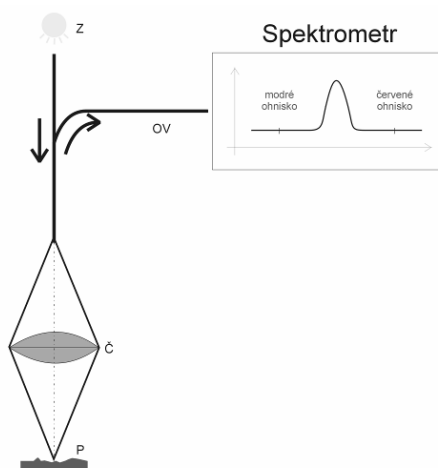
4.3 Optické metody

Jedná se o nedestruktivní a bezdotykové měření, které nepřímo kopíruje povrch vzorku světelným paprskem, aniž by se povrchu dotýkalo, jak je tomu u mechanického profilometru. Tyto metody se používají k měření mikrostruktury povrchu [22].

Princip optické metody je založen na interakci světla a povrchu. Na měřený vzorek je promítán světelný svazek, který po odrazu od vzorku prochází zpět zobrazovací soustavou a dopadá na detektor (CCD kamera). Vzájemné působení mezi světelným paprskem a povrchem závisí na vlnové délce světla, drsnosti povrchu a na vlastnostech měřeného vzorku. Následuje zpracování signálu a vyhodnocení výsledků. Pro názornost se budu v práci zabývat optickými metodami jako je konfokální mikroskopie, optická profilometrie či polarizační mikroskopie [22].

4.3.1 Optický profilometr MicroProf FRT

Bílé světlo ze zdroje *Z* je optickým vláknem *OV* přivedeno ke spojné čočce *Č*. Po dopadu na měřený povrch vzorku je fokusované světlo optimálně odraženo zpět do zmíněné čočky a optickým vláknem přivedeno do miniaturního spektrometru (obr. 4.3) [25].



Obr. 4.3 Princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT v základním provedení s optickým senzorem CHR 150 N [25]

4.3.2 Konfokální mikroskopie

Konfokální mikroskop je druhem optického mikroskopu, jehož výhodou je vyšší rozlišovací schopnost daná detekcí světla pouze z ohniskové roviny mikroskopu [26].

Konfokální mikroskopy se dělí na [26]:

- laserové rastrující konfokální mikroskopy,
- konfokální mikroskopy s rotujícím diskem.

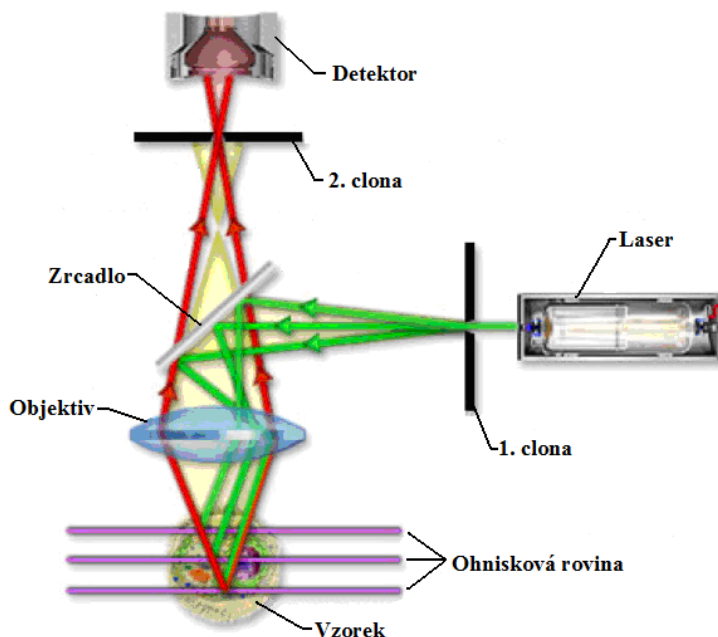
Laserový rastrovací konfokální mikroskop

Prvním vynálezcem konfokálního mikroskopu byl Marvin Minsky z USA, který jej nechal patentovat v roce 1957. V té době však neměl uplatnění, neboť nenalezl vhodný zdroj světla. Až koncem 70. byl zkonstruován první spolehlivý laserový konfokální mikroskop [27], [28]. Principem konfokálního mikroskopu je to, že netvoří obraz vcelku, najednou, ale bod po bodu, řádkováním.

Měřený povrch je řádkovacím způsobem postupně osvětlován laserem, paprsek je fokusován na clonu, zrcadlo a dále prochází přes objektiv (obr. 4.4). Odražené, rozptýlené záření je stejným objektivem zobrazeno na druhou clonu (filtruje jiná záření, než z měřeného povrchu) a do detektoru. Detektorem může být fotonásobič či lavinová dioda. Konfokální obrazy optických řezů vznikají v číselné formě a lze je proto dále upravovat všemi běžnými způsoby počítačového zpracování obrazů [26], [28], [29].

Existují tři metody rastrování [27]:

- cestou rozmítání laserového paprsku,
- příčným posouváním vzorku před objektivem,
- posouváním objektivu nad vzorkem.

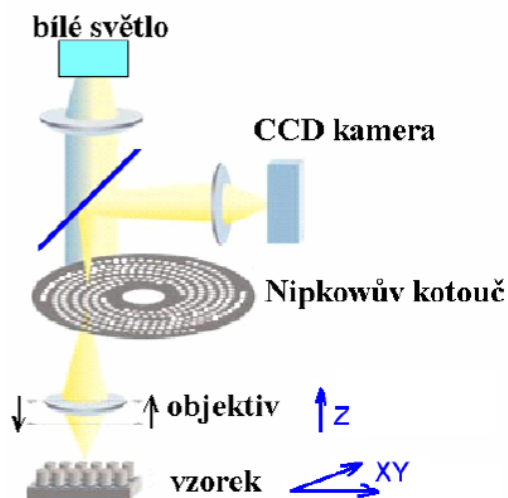


Obr. 4.4 Princip laserového rastrovacího konfokálního mikroskopu [28]

Konfokální mikroskop s rotujícím diskem

V roce 1967 M. Petrán a M. Hadravský z Lékařské fakulty UK v Plzni patentovali konfokální mikroskop na bázi rotujícího Nipkowova kotouče (obr. 4.5). S tímto přístrojem byly poprvé získány kvalitní optické řezy vzorkem větší tloušťky. Tandemový konfokální mikroskop se však nedočkal většího rozšíření v praxi [28].

Nipkowův kotouč má desítky až stovky tisíc otvorů, slouží k omezení rozptylu světla. Umožňuje sledování vzorku v reálném čase díky rotujícímu rastrovacímu kotouči [30].

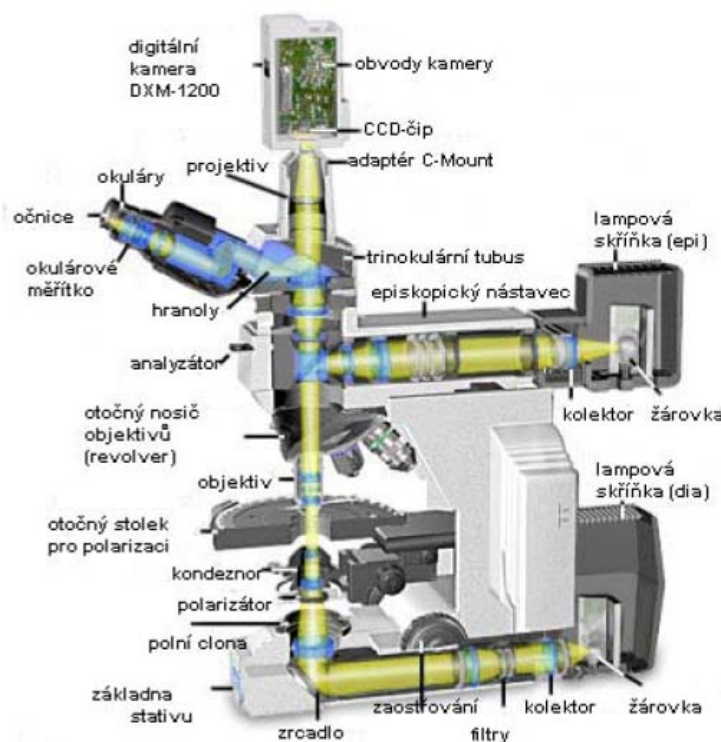


Obr. 4.5 Princip konfokálního mikroskopu s rotujícím diskem [31]

4.3.3 Polarizační mikroskop

Mikroskop je vybaven polarizačním zařízením, které se skládá z polarizátoru a analyzátoru. Princip spočívá ve snímání sekvence obrazů studovaného povrchu při různém zaostření (s jinými ohnisky) a v jejím následném softwarovém zpracování (obr. 4.6) [24], [32].

Polarizační mikroskopie využívá vlastnosti světla, které říkáme polarizace. Tato mikroskopická technika má hlavní využití při pozorování neprůhledných objektů [33]. Hranoly v tubusu dělí chod paprsků do okulárů nebo do výstupu pro kameru. Na stativu je osvětlovací nástavec s lampovou skříňkou pro episkopické osvětlení (osvětlení dopadajícím světlem). Mikroskop je vybaven pro polarizační měření. V optické ose je polarizační analyzátor a kondenzor s polarizátorem. Stolek je otočný se stupnicí v úhlové míře s noniem. Diaskopické osvětlení, vestavěné do stativu, je vybaveno kolektorem, filtry a polní clonou. Z pohledu je levý zaostřovací systém zakryt, vidíme jen jeho pravou část [33].



Obr. 4.6 Princip optického polarizačního mikroskopu Nikon ECLIPSE E 600 [33]

Zhodnocení výhod a nevýhod optických metod měření topografie povrchu je uvedeno v tab. 4.2.

Tab. 4.2 Výhody a nevýhody optických metod [24]

Výhody optických přístrojů	Nevýhody optických přístrojů
- bezkontaktnost a nedestruktivnost	- nepřímé měření parametrů topografie povrchu
- okamžité výsledky	- složitější interpretace výsledků
- schopnost kontinuální kontroly a řízení kvality povrchu	- ztížená korelovatelnost na normované parametry
- opakovatelnost měření	
- možnost měření z větší vzdálenosti	
- velká rychlost snímání	

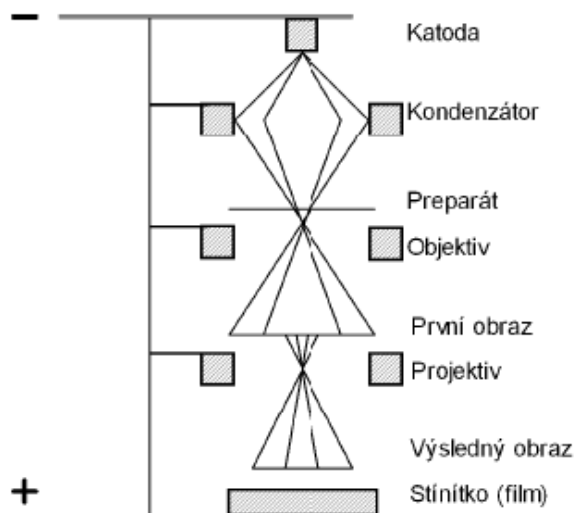
4.4 Jiné metody

Existuje celá řada metod měření charakteristik topografie povrchu, které pracují na jiném principu než na mechanickém nebo optickém. Zde je uvedeno několik známějších metod jako je elektronová mikroskopie (SEM, TEM) či mikroskopie s rastrující sondou (STM, AFM, MFM...) a další.

4.4.1 Metoda transmisní elektronové mikroskopie TEM

Mikroskop i se vzorkem se musí nacházet ve vakuu, protože ve vzduchu by docházelo k pohlcování elektronů [34], [35].

Princip TEM je znázorněn na obr. 4.7. Zdrojem elektronů je kovová katoda, která po rozžhavení vysílá proud urychlených elektronů elektrickým polem o napětí 50 až 220 kV. Elektrony prochází elektronovou čočkou, která je tvořena elektrickým polem kondenzátoru nebo magnetickým polem cívky. Paprsek prochází čočkou na vzorek (preparát) a poté na další čočku a vytvoří 1. obraz. Část obrazu se čočkou zvětší a výsledný obraz se promítne na fluorescenční stínítko či obrazovku. Díky nim lze proud elektronů zviditelnit, protože výsledný obraz nelze pozorovat přímo okem [24], [32], [35].

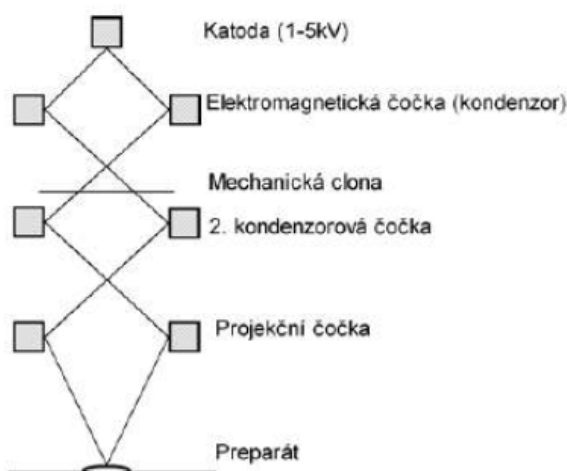


Obr. 4.7 Transmisní elektronový mikroskop [32]

4.4.2 Metoda rastrovací elektronové mikroskopie SEM

Vzorek může být relativně velký, pokud je vodivý. Nevodivé vzorky je nutno učinit vodivými např. napařením kovu nebo uhlíku [34], [35].

SEM pracuje tak, že na vzorek dopadá velmi tenký svazek elektronů vysílaných kovovou katodou (obr. 4.8), který pomocí vychylovacího zařízení přejíždí postupně všechna místa vzorku (preparátu). Dopadající elektrony se rozptylují do okolí a mohou vyrážet elektrony z povrchu vzorku. Odražený paprsek je detekován pomocí senzoru citlivého na elektrony a signál se převádí do softwaru počítače a zviditelňuje na jeho obrazovce [32].



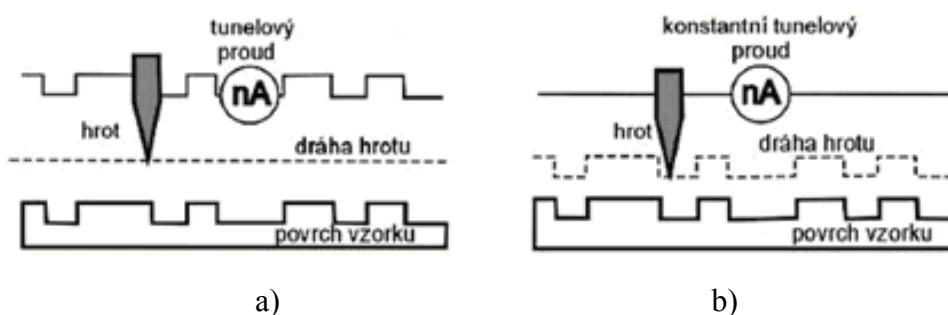
Obr. 4.8 Rastrovací mikroskop [32]

4.4.3 Metoda mikroskopie tunelovacího proudu STM

Vlastní měření probíhá tak, že nejprve se provede hrubý posuv vzorku k hrotu ve směru z (hrot je zde tvořen zaostřeným drátkem, např. wolframovým). Poté dojde k přiložení napětí mezi hrot a vzorek, aby mohl procházet proud. Dále se jemným posuvem (pomocí piezokeramiky) přiblíží vzorek ke hrotu tak, aby procházející proud nabyl měřitelných hodnot, poté se přibližování zastaví. Získání obrazu (skenování) se provádí skokovým posuvem, zpravidla se pohybuje po řádcích [36].

Tento signál může být dvojího druhu, v závislosti na režimu měření (obr. 4.9) [35]:

- a) Režim konstantní výšky** - hrot se pohybuje ve vodorovné rovině xy nad vzorkem a tunelový proud se mění v závislosti na vzdálenosti povrchu vzorku od hrotu a na lokálních povrchových elektrických vlastnostech vzorku. Tento režim umožňuje rychlé snímání obrazu. Je ovšem méně přesný, proto se spíše používá u hladkých povrchů.
- b) Režim konstantního proudu** - využívá STM zpětné vazby tak, aby byla udržena konstantní hodnota tunelového proudu. V případě, že systém detekuje zvýšení tunelového proudu, je přivedeno odpovídající napětí k piezoelektrickému systému za účelem oddálení hrotu od povrchu vzorku nebo naopak. To se zpravidla uskutečňuje pomocí laserového systému s optoelektronickou detekcí. Tento režim je pomalejší, ale přesnější. Proto se používá k mapování členitějších povrchů. V režimu konstantního proudu může také dojít k poškození povrchu vzorku.



Obr. 4.9 Režimy měření tunelového proudu v STM [35]

4.4.4 Metoda mikroskopie atomárních sil AFM

AFM využívá na měření povrchu vzorku ostrý, křemíkový nebo Si_3N_4 hrot délky několik desítek mikrometrů (obr. 4.10). Tento hrot je upevněn na ohebném nosníku a během měření se pohybuje po povrchu vzorku, čímž „kopíruje“ nerovnosti a podle jeho reliéfu se ohýbá ve směru osy z (kolmo na povrch vzorku). Detekce ohybu nosníku je

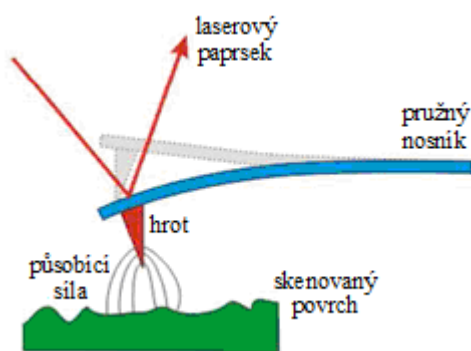
založená na optickém principu (zpravidla laserovým snímačem). Na základě tohoto snímání je pak pomocí softwaru počítače vytvářen celkový obraz povrchu vzorku [37].

Podle oblasti závislosti, ve které pracujeme, rozlišujeme kontaktní a nekontaktní režim AFM (obr. 4.11) [37]:

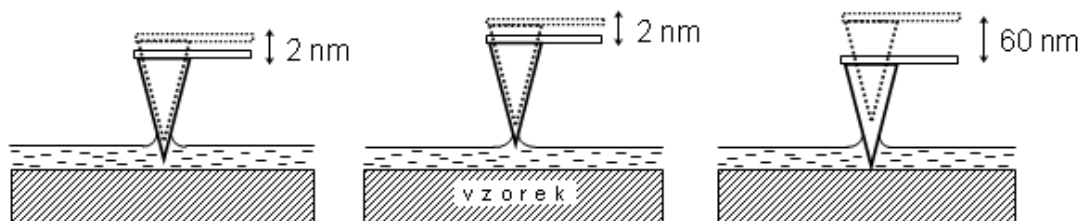
a) Kontaktní režim: hrot sondy je v kontaktu se vzorkem (dochází k poškození vzorku – třecí síly) a je tak udržován jemný mechanický kontakt mezi hrotem a povrchem vzorku (vzdálenost je max. 0,1 nm). Kontaktní režim lze provozovat ve dvou modifikacích: s konstantní výškou nebo s konstantní silou. Častěji se využívá modifikace s konstantní silou. Měření je sice pomalejší, ale přesnější.

b) Nekontaktní režim: nosník s hrotem kmitá v blízkosti povrchu vzorku, přičemž jejich vzájemná vzdálenost kolísá od 1 nm po několik desítek nm. Výsledná síla mezi hrotem a povrchem vzorku je přitažlivá a extrémně malá (pohybuje se okolo 10^{-12} N). Měření je proto obtížnější než v kontaktním režimu. Přesto je nekontaktní režim výhodnější, protože při něm nedochází k poškození povrchu vzorku, a to hlavně u měkkých materiálů.

c) Poklepový režim: nosník s hrotem kmitá v blízkosti povrchu vzorku. Rozkmit nosníku je ovšem větší než v předchozím případě. Proto dochází k občasnému dotyku hrotu s povrchem. Obraz je tu opět vytvářen na základě sledování změn rezonanční frekvence a amplitudy kmitů hrotu.



Obr. 4.10 Mikroskop atomárních sil [38]

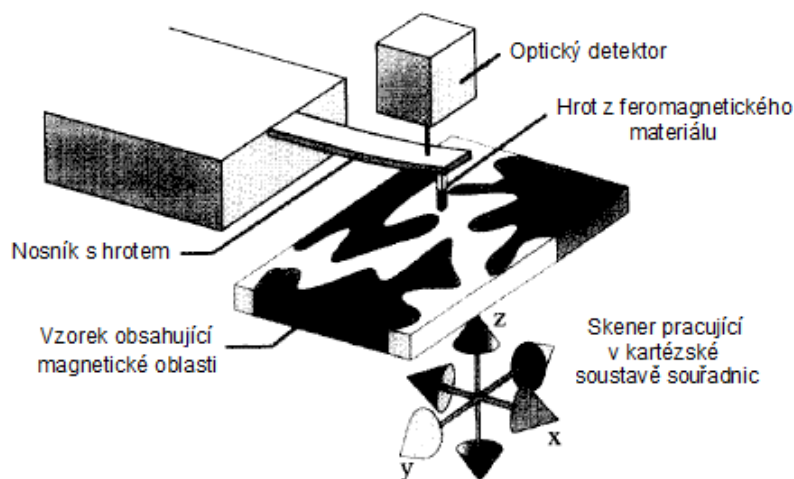


Obr. 4.11 Režimy mikroskopie atomárních sil

a) kontaktní režim, b) nekontaktní režim, c) poklepový režim [34]

4.4.5 Metoda mikroskopie magnetických sil MFM

Zobrazuje prostorové rozložení magnetických sil na povrchu vzorku podobným způsobem jako bezdotyková AFM, jen hrot je pokryt ferromagnetickou vrstvou. S ohledem na dlouhodobé působení magnetických sil vyvolaných vzorkem na zmagnetizovaný hrot. Jde o měření, které probíhá v nekontaktním režimu. Princip měření je patrný z obr. 4.12 [36].



Obr. 4.12 Princip MFM – Pružný nosník s hrotem registruje na změny stavu nosníku v závislosti na interakci mezi magnetickým polem vzorku a hrotu z ferromagnetického materiálu [36]

„Nosník zakončený ostrým magnetickým hrotem je senzorem působící síly. Jakmile je sonda v dostatečné vzdálenosti od povrchu vzorku, obvykle jde o desítky až stovky nanometrů. Vlivem magnetických interakcí mezi hrotem a vzorkem dochází ke změnám polohy nosníku, které bývají většinou detekovány optickou cestou. Ve výstupním signálu jsou zahrnuta jak data topografická, tak i magnetická a lze je rozlišit snímáním obrazu při různých výškách, protože magnetické síly jsou dalekého dosahu, tedy blízko povrchu je obraz převážně topografický, dále jen magnetický. Rozměry skenované oblasti se pohybují od 1 - 200 μm [36].“

4.5 Normované parametry profilu povrchu

Topografie povrchu je členěna na jednotlivé složky podle rozteče příslušných nerovností. Normy ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288 definuje tyto geometrické parametry [39], [40]:

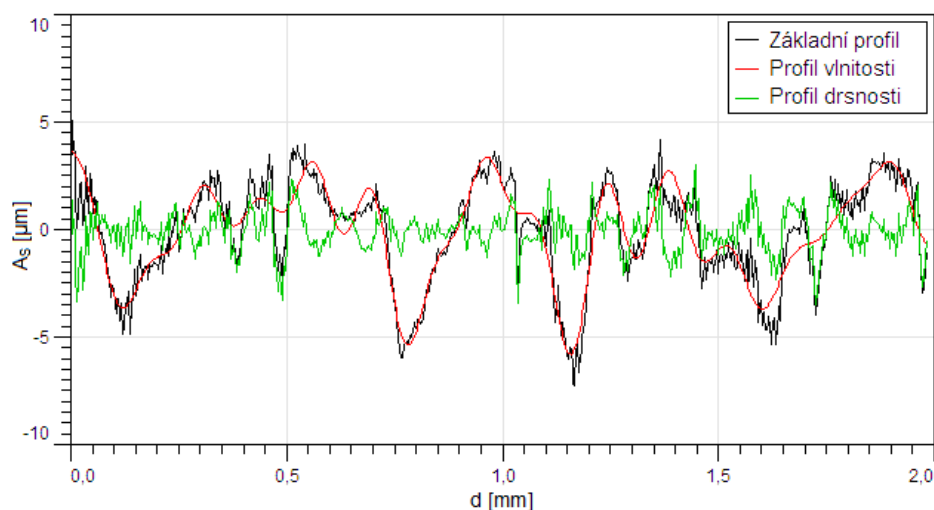
R – pro drsnost povrchu,

W – pro vlnitost povrchu,

P – pro základní profil.

Drsnost povrchu (mikronerovnost), je podmíněna technologickým pochodem a pravidelně se opakuje. Problém posuzování nerovností (drsností) se řeší redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. V rovině řezu se získá profil, který je základním zdrojem informace pro posuzování drsnosti. Dosud se v technické praxi běžně používá k jejich hodnocení zjednodušená (normalizovaná) metoda využívající profil nerovnosti vzniklý v rovině řezu (2D) stanovený normami [39] a [40].

Při vlastním hodnocení sejmutého profilu formou číselných hodnot parametrů povrchu se uplatňují základny tvořené použitým typem filtru, který slouží k oddělení frekvenčních složek nerovností profilu. Jedná se o složky signálu různých vlnových délek příslušející základnímu profilu, profilu vlnitosti povrchu a drsnosti povrchu (obr. 4.13) [40].



Obr. 4.13 Znáznornění signálu různých vlnových délek příslušející základnímu profilu, profilu vlnitosti a drsnosti povrchu [39],

kde d je vzdálenost [mm] a A_s je výšková nerovnost [μm]

Základní profil - (P profil – *primary profile*) – profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny,

profil drsnosti - (R profil – *roughness profile*) – profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c ,

profil vlnitosti - (W profil – *waviness profile*) – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c .

Je známo několik normalizovaných charakteristik drsnosti povrchu, ale v práci se zabývám jen průměrnou aritmetickou úchylnou posuzovaného profilu Ra , průměrnou kvadratickou úchylnou posuzovaného profilu Rq a nejvyšší výškou profilu Rz .

Definování některých charakteristik [39]:

Základní délka l – délka ve směru osy X , použitá pro rozpracování nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil.

Výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x – $Z(x)$.

Průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu Ra – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad [\mu\text{m}] \quad (4.1)$$

nebo

$$Ra = \frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} |y(x)| dx \quad ; \quad Ra \approx \frac{l}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)| \quad [\mu\text{m}] \quad (4.2)$$

kde je: l_p – měřená délka [m]

$y(x)$ – funkce popisující profil [-]

$y(x_i)$ – souřadnice n bodů profilu povrchu v mezích [-] měřené délky, $i = 1, 2, 3 \dots n \dots$

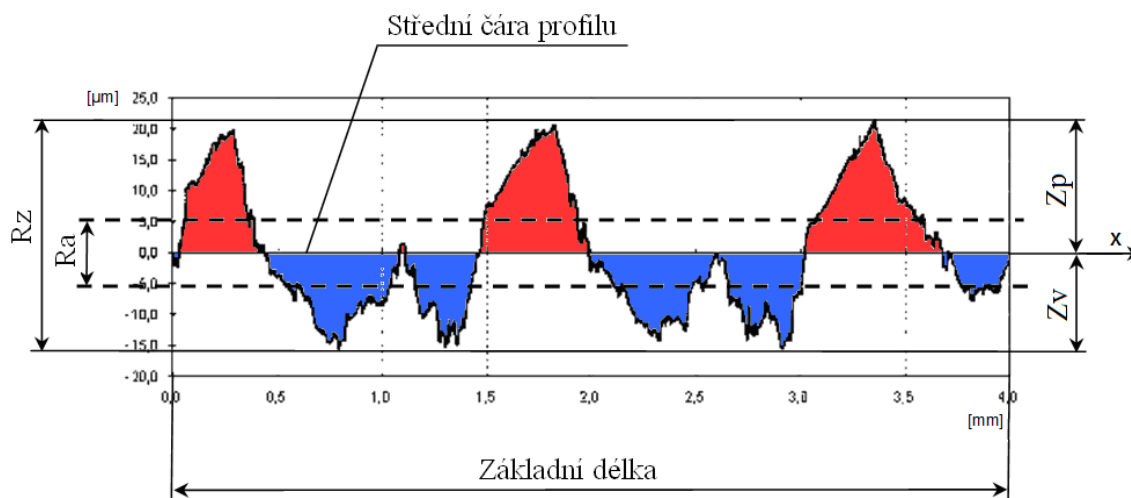
Střední kvadratická odchylka profilu Rq - je kvadratickou analogií parametru Ra . Z hlediska kvantitativního hodnocení amplitud nerovností povrchu je nejdůležitější hodnotou, protože reflektuje jeho časově-prostorový průběh a současně má přímý vztah k jeho energetickému obsahu a je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti nerovností povrchu. Je definována implicitním zápisem této topografické funkce.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_p} \int_0^{l_p} y^2(x) dx} \text{ nebo } Rq \approx \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2(x_i)} . \quad [\mu\text{m}] \quad (4.3)$$

Největší výška profilu Rz – součet výšky Zp nejvyššího výstupku profilu a hloubky Zv nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l .

$$Rz = Zp + Zv \quad [\mu\text{m}] \quad (4.4)$$

Na obr. 4.14 je uveden příklad textury profilu s vyznačením jednotlivých parametrů drsnosti.



Obr. 4.14 Příklad profilu textury [40]

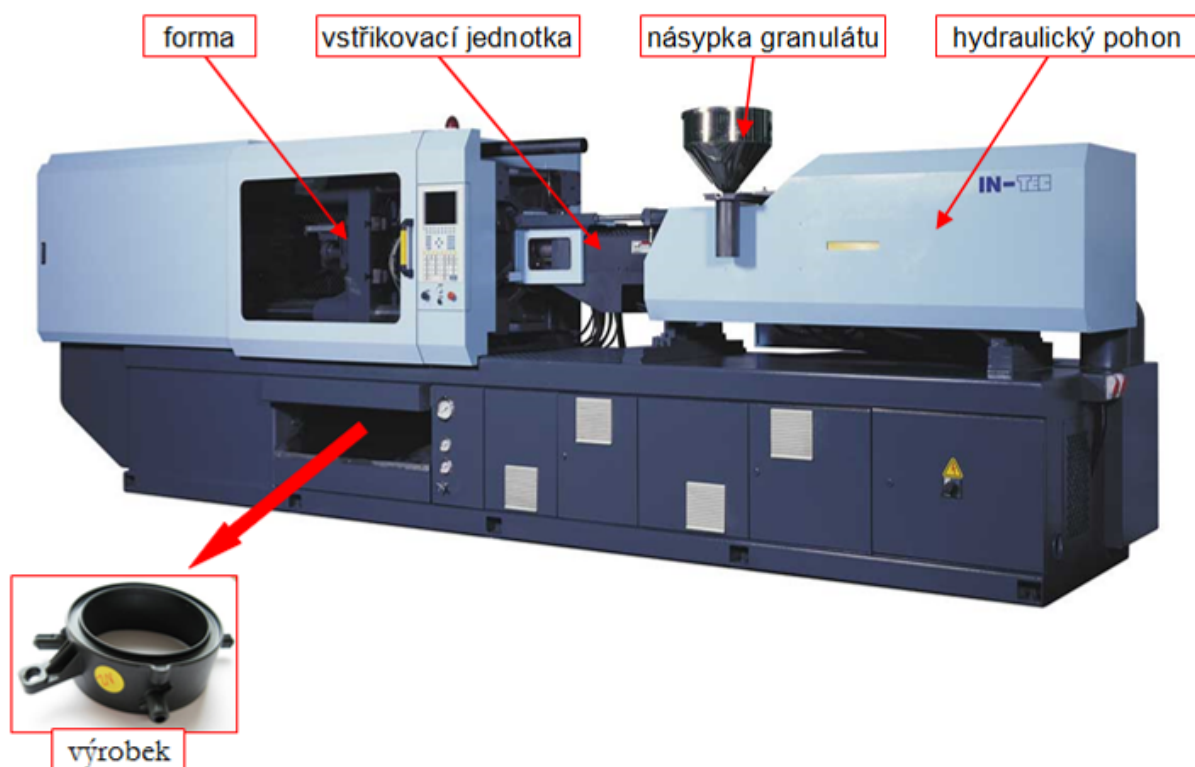
Výstupek profilu – z povrchu ven směřující (z materiálu do okolního prostředí) část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou x ,

prohlubeň profilu – dovnitř směřující (z okolního prostředí do materiálu) část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou x [40].

5 Experimentální část

Firma PF PLASTY CZ s.r.o. vyrobila vstřikovací metodou (obr. 5.1) výrobky, z nichž nám poskytla 6 vzorků (obr. 5.2). Ve všech případech se jedná se o část zadního světla do automobilu. Výrobky jsou ze 2 různých forem a jsou označeny S1, S2 pro výrobky ze staré formy, N2, N3 pro výrobky z nové formy a N2 opal, N3 opal pro výrobky z nové formy, které byly následně opáleny.

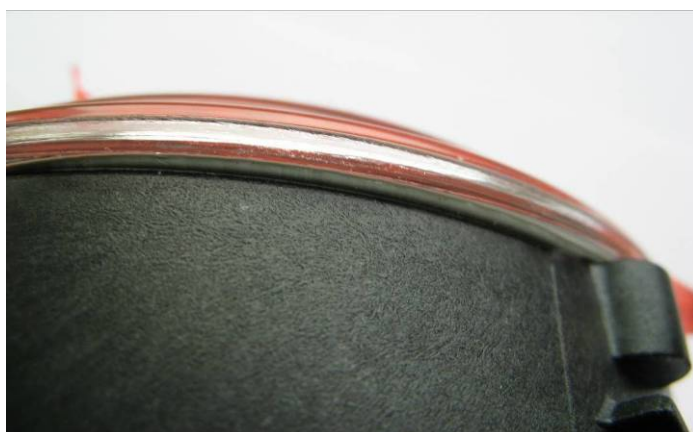
Firma měla u výrobků z nové formy u odběratele časté reklamace, kvůli problémům s přilnavostí plastu (materiálu PBT) a plexiskla (obr. 5.3) spojeného lepidlem. Problém se snažila řešit opalem výrobků, počet reklamací se snížil, ale byl pořád větší než u výrobků ze staré formy a opal byl nákladný. Proto byla na plastových výliscích měřena drsnost povrchů optickým profilometrem MicroProf FRT.



Obr. 5.1 Popis vstřikovacího lisu s výrobkem [40]



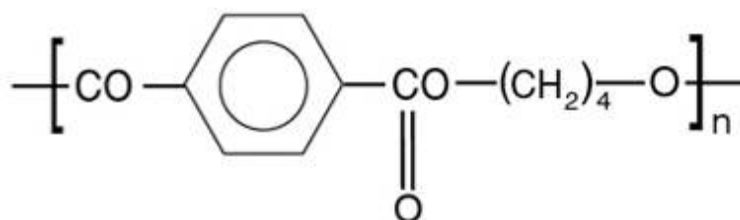
Obr. 5.2 Měřený výrobek



Obr. 5.3 Fotka slepené součásti (materiál PBT a plexisklo)

5.1 Polybutylen tereftalát – PBT

Materiál, kterým byly dané výlisky vyrobeny, je polybutylen tereftalát PBT (obr. 5.4), který se řadí mezi termoplasty.



Obr. 5.4 Chemický vzorec PBT [42]

Vlastnosti materiálu PBT [42], [43], [44]:

- téměř amorfni až semikrystalický materiál,
 - vysoká tvarová stálost za tepla,
 - vysoká tuhost a tvrdost,
 - výborné kluzné vlastnosti,
 - odolnost proti otěru,
 - odolnost vůči toku za studena,
 - minimální nasákavost,
 - snížená hořlavost,
 - mimořádná rozměrová stálost,
 - vynikající elektrické izolační vlastnosti i při vyšších teplotách nebo ve vlhkém prostředí,
 - vynikající chemická odolnost
- a) odolává - slabým louhům a kyselinám, roztokům solí, alkoholům, éterům, tukům, olejům, pohonným směsím;
- b) neodolává – alkáliím, silným kyselinám, ketonům, fenolům,
- velmi dobré tepelné vlastnosti a tepelná odolnost proti stárnutí,
 - velmi dobrá barevná stálost.

Vstřikovací rychlost

Vysoké vstřikovací rychlosti k zamezení tvorby studených spojů vzhledem k rychlému tuhnutí materiálu. Při počáteční malé vstřikovací rychlosti, která se pomalu zvětšuje, dochází k vytvoření matné skvrny v místě vtoku. Při vysokých vstřikovacích rychlostech je nutno dobře odvdzdušnit tvarové dutiny [43].

Vstřikovací tlak: jsou používány vyšší vstřikovací tlaky, 10 - 12 MPa.

Dotlak: 60-90% vstřikovacího tlaku.

Otáčky šneku: 100 ot.min⁻¹, aby se nezatěžoval zvýšeným frikčním teplem.

Teplota taveniny: 250 °C až 270 °C

Teplota nástroje: 40 - 90°C, čím vyšší je teplota nástroje, tím lepší je kvalita výstřiku, zlepšují se mechanické vlastnosti a zvyšuje se smrštění.

Smrštění: 1,2 - 2,2%

Předsušení: ano (povolena zbytková vlhkost 0,04 %)

Výrobní pokyny [43], [45]:

- Musí být udržován obsah reziduální vlhkosti, aby se zaručily velmi dobré mechanické a elektrické vlastnosti.
- Maximální teplota zpracování doporučená výrobcem nemá být překročena.
- Vyšší teploty formy jsou doporučeny pro díly se speciálně přísnými tolerancemi rozměrů. To snižuje post-smrštění na minimum.
- Při přerušení produkce na dobu delší než 10 min je třeba teplotu válce nastavit na cca 200°C. Při delším přerušení se topení termostatem vypne. Je-li plastifikační válec znečištěn degradovaným materiálem, je nutné vyčistit válec.

5.2 Optický profilometr MicroProf FRT

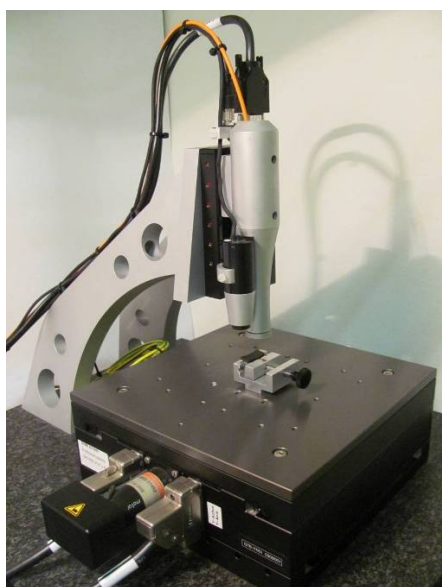
Princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT v základním provedení s optickým senzorem CHR 150 N je následující (obr. 5.5) [17], [25], [45]:

Bílé světlo ze zdroje Z je optickým vláknem OV přivedeno ke spojné čočce \check{C} , která v důsledku své (velké) chromatické aberace fokusuje jednotlivé monochromatické složky bílého světla do různé výšky nad vztaznou rovinou. Po dopadu na studovaný povrch P vzorku je fokusované světlo (na rozdíl od světla nefokusovaného) optimálně odraženo zpět do zmíněné čočky a optickým vláknem přivedeno do miniaturního spektrometru. Měřené hodnoty nezávisí na intenzitě odraženého světla, ale pouze na jeho vlnové délce. Spektrometr detekuje barvu světla odraženého od vzorku a určuje vertikální polohu na povrchu vzorku pomocí vnitřní kalibrační tabulky. Přístroj umožňuje měření vertikálním rozlišením 3 nm, laterálním rozlišením 2 μm , maximálním úhlem sklonů povrchových nerovností ke střední rovině povrchu 30°. Minimální rozsah xy je 200 μm , x 200 μm , maximální rozsah xy je 100 mm, x 100 mm a měřicí rozsah z 300 μm – 3 mm, pro měření pomocí optického senzoru CHR 150 N (obr. 5.6).

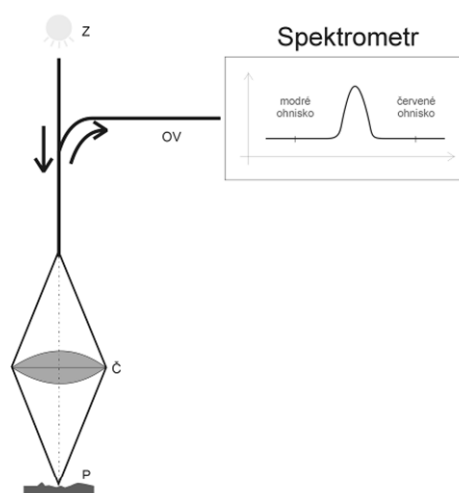
Vzorek je umístěn na skenovacím stolku, jehož velmi rychlý a přesný pohyb v definovaných liniích pod nepohybujícím se senzorem umožňuje získat údaje o topografii studovaného povrchu nejen podél zvolené linie, ale z celé plochy povrchu. Senzor optického profilometru získává potřebná data nezávisle z každého měřicího bodu, což vede k vysoké rychlosti měření. [25]

Integrovaný software se skládá ze dvou částí: MARK III pro analýzu dat a ACQUIRE pro snímání objektů, který umožňuje [25]:

- vybrat měřenou linii či oblast povrchu (v této souvislosti je velmi užitečná vizuální kontrola povrchu, kterou poskytuje se senzorem spjatá CCD kamera),
- manipulovat se senzorem či skenujícím stolem vzorku,
- nastavit parametry snímání,
- předzpracovat získaná data.

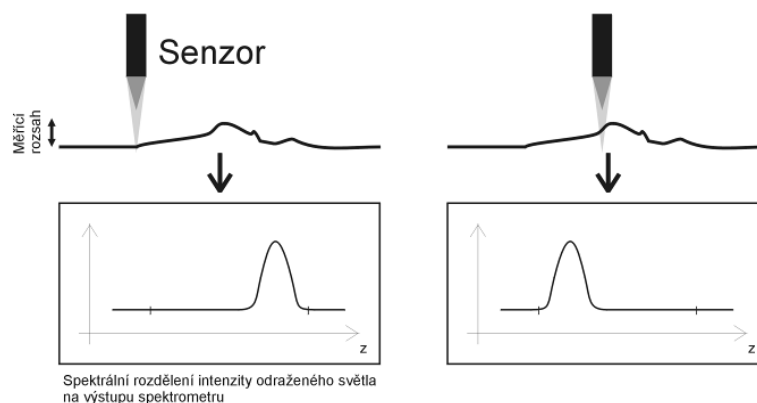


a)



b)

Obr. 5.5 a) je optický profilometr MicroProf FRT s měřeným vzorkem, b) princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT v základním provedení s optickým senzorem CHR 150 N [25]



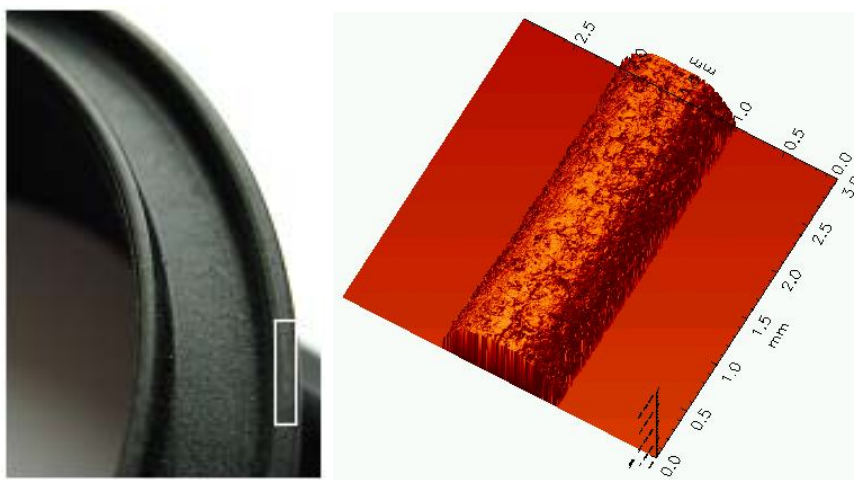
Obr. 5.6 Princip činnosti senzoru CHR 150 N [25]

5.3 Analýza dat získaných přístrojem MicroProf FRT

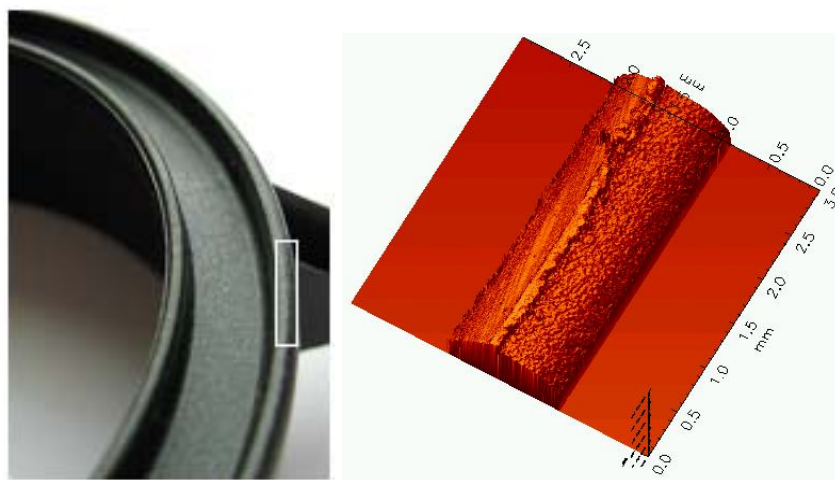
Vytvořené vzorky z plastů byly měřeny optickým profilometrem MicroProf FRT, přičemž byly měřeny jak hrany, tak čtvercové plochy u vzorků označených S1, S2, N2, N3, N2opal a N3opal. Na obr. 5.7, 5.17 jsou fotky a ukázky 3-D topografie povrchu. Z těchto ploch byla vypočtena řada parametrů topografie, ale pro další analýzu byly vybrány pouze některé parametry pro 3-D jako je sRa , sRq a sRz . Tyto 3-D parametry jsou získány z měřené plochy (u hrany 3 x 1 mm a u plochy 3,5 x 3,5 mm). Pro další analýzu je vytvořena projekce 3-D obrazu a jsou vypočítány 2-D standardní parametry z jednotlivých měřicích linií, ze kterých je získán signál.

5.3.1 Měření hran

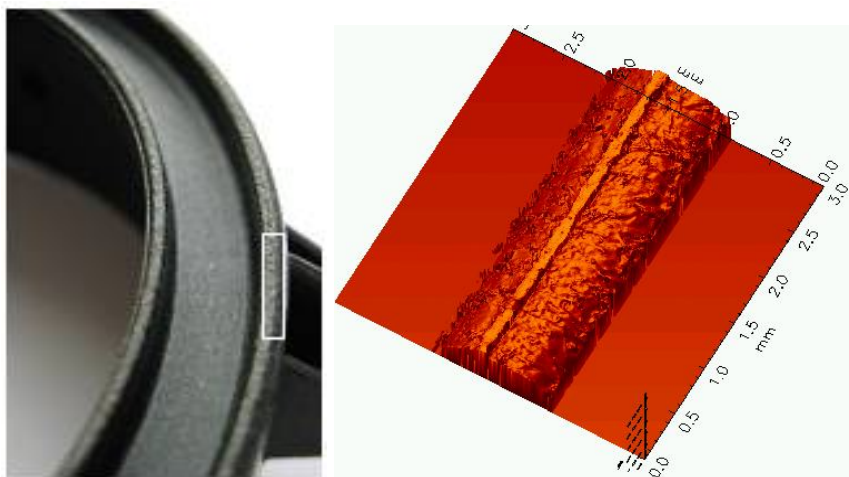
Byly měřeny hrany 3 x 1 mm, a to u vzorků označených S1, S2, N2, N3, N2opal a N3opal. Na obr. 5.7 jsou fotky a ukázky 3-D topografie povrchu.



a)



b)



c)

Obr. 5.7 Vybrané fotografie a digitální 3-D obrazy výlisků hran ze a) staré formy S2, b) nové formy N2, c) N2 s opalem

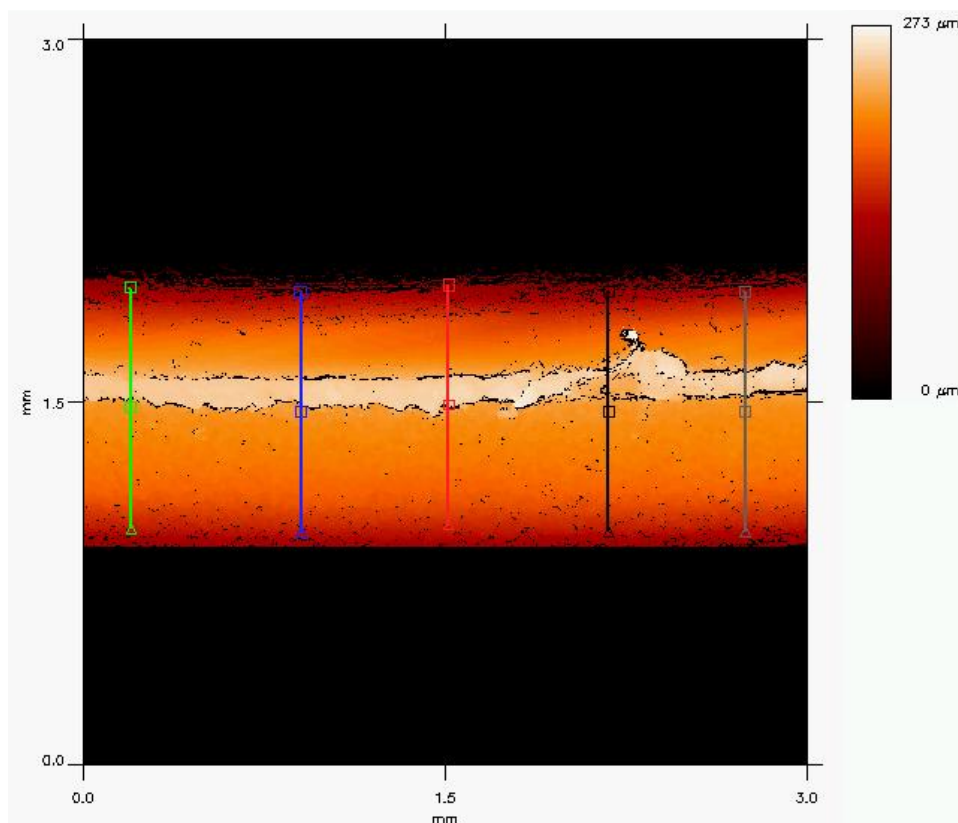
Z těchto ploch byla vypočtena řada parametrů topografie, ale pro další analýzu byly vybrány tyto 3-D parametry, a to plošná střední aritmetická odchylka topografie povrchu sRa , plošná střední kvadratická odchylka topografie povrchu sRq a plošná největší výška nerovnosti topografie povrchu sRz . V tab.5.1 je také pro ilustraci proveden poměr sRa/sRz . Tyto 3-D parametry jsou brány z celé plochy 1 x 3,5 mm.

Měřené vzorky byly pro zjednodušení označeny čísly 1 - 6 (1 - vzorek S1, 2 - vzorek S2, 3 - vzorek N2, 4 - vzorek N3, 5 - vzorek N2opal a 6 - vzorek N3 opal).

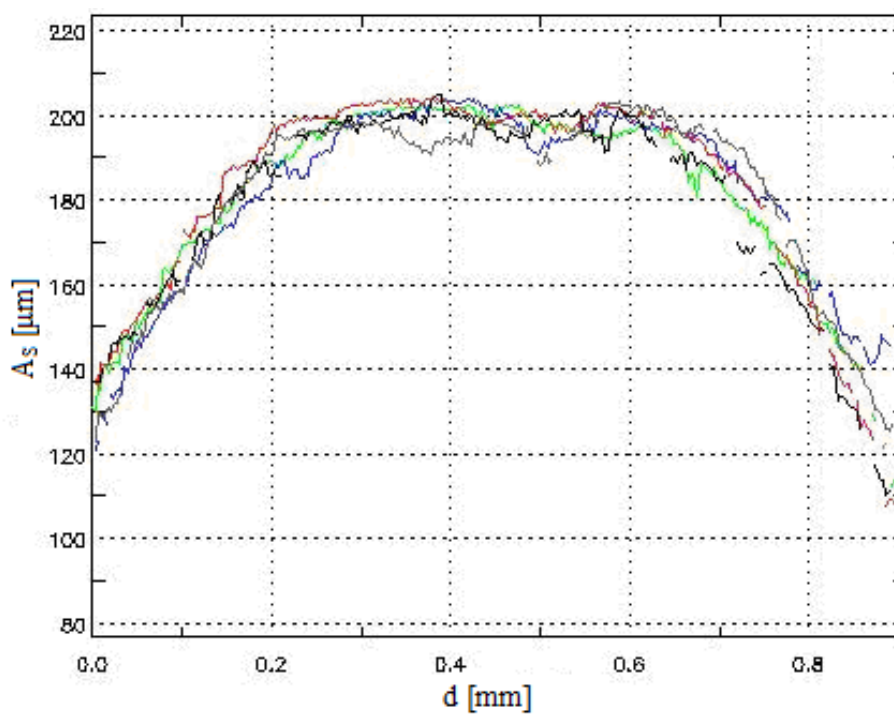
Tab. 5.1 Parametry 3-D topografie povrchu z jednotlivých hran.

Měřený vzorek	sRa [μm]	sRq [μm]	sRz [μm]	sRa/aRz
1 - S1	6,194	8,696	60,004	0,103
2 - S2	8,192	12,529	75,601	0,108
3 - N2	9,081	12,537	70,445	0,129
4 - N3	8,868	11,85	65,349	0,136
5 - N2 opal	11,346	15,459	118,296	0,096
6 - N3 opal	10,194	13,454	80,893	0,126

Pro výpočty 2-D standardních parametrů byla z naměřených ploch o velikosti 3 x 1 mm provedena projekce těchto ploch a vybráno pět měřicích linií (obr. 5.8) pro ukázkou. Z těchto měřicích linií byly získány 2-D standardní parametry, které jsou uvedeny v tabulkách (tab. 5.2 – 5.6).



Obr. 5.8 Projekce 3-D obrazu vylisku z nové formy N2



Obr. 5.9 Signál získaný z daných linií
 kde d je vzdálenost [mm] a A_s je výšková nerovnost [μm]

Tab. 5.2 2-D standardní parametry získané **pro zelené měřicí linie** u jednotlivých vzorků

Měřený vzorek	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Ra/Rz
1 - S1	3,02	4,189	12,002	0,252
2 - S2	1,004	1,384	6,242	0,161
3 - N2	3,49	4,964	14,798	0,236
4 - N3	11,181	13,749	32,277	0,346
5 - N2 opal	11,406	14,289	35,852	0,318
6 - N3 opal	13,194	15,388	34,215	0,386

Tab. 5.3 2-D standardní parametry získané **pro modré měřicí linie** u jednotlivých vzorků

Měřený vzorek	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Ra/Rz
1 - S1	6,134	7,929	17,163	0,357
2 - S2	2,164	4,347	10,192	0,212
3 - N2	6,435	7,9	17,251	0,373
4 - N3	8,176	11,103	22,764	0,359
5 - N2 opal	11,872	14,778	25,102	0,473
6 - N3 opal	10,198	14,708	34,863	0,293

Tab. 5.4 2-D standardní parametry získané **pro červené měřicí linie** u jednotlivých vzorků

Měřený vzorek	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Ra/Rz
1 - S1	2,104	2,949	9,497	0,222
2 - S2	3,904	5,762	10,878	0,359
3 - N2	7,522	9,586	21,048	0,357
4 - N3	12,247	16,239	32,77	0,374
5 - N2 opal	12,936	16,415	29,429	0,440
6 - N3 opal	9,851	14,135	29,544	0,333

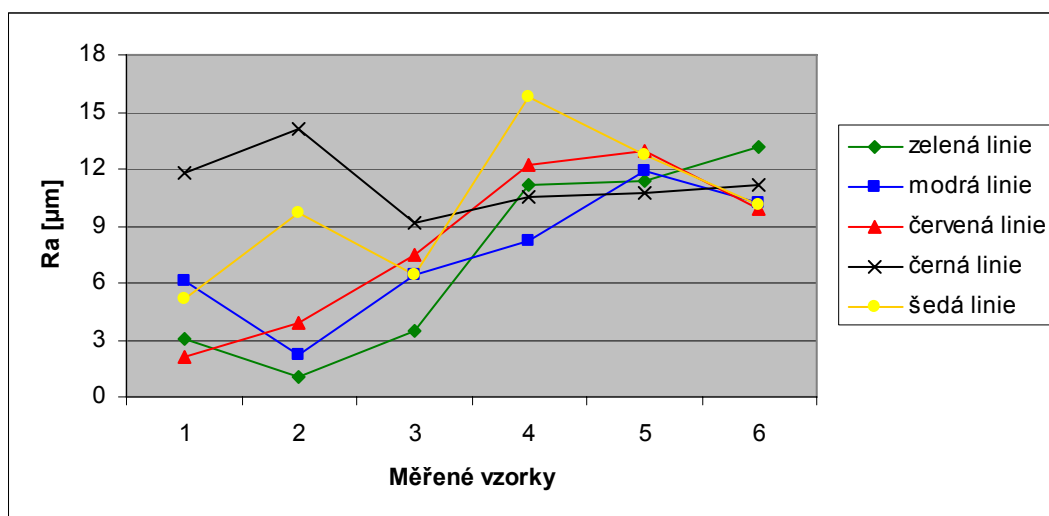
Tab. 5.5 2-D standardní parametry získané **pro černé měřicí linie** u jednotlivých vzorků

Měřený vzorek	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Ra/Rz
1 - S1	11,823	13,759	32,575	0,363
2 - S2	14,096	15,093	22,23	0,634
3 - N2	9,196	11,73	20,857	0,441
4 - N3	10,528	14,442	25,171	0,418
5 - N2 opal	10,757	14,725	35,155	0,306
6 - N3 opal	11,18	15,944	26,762	0,418

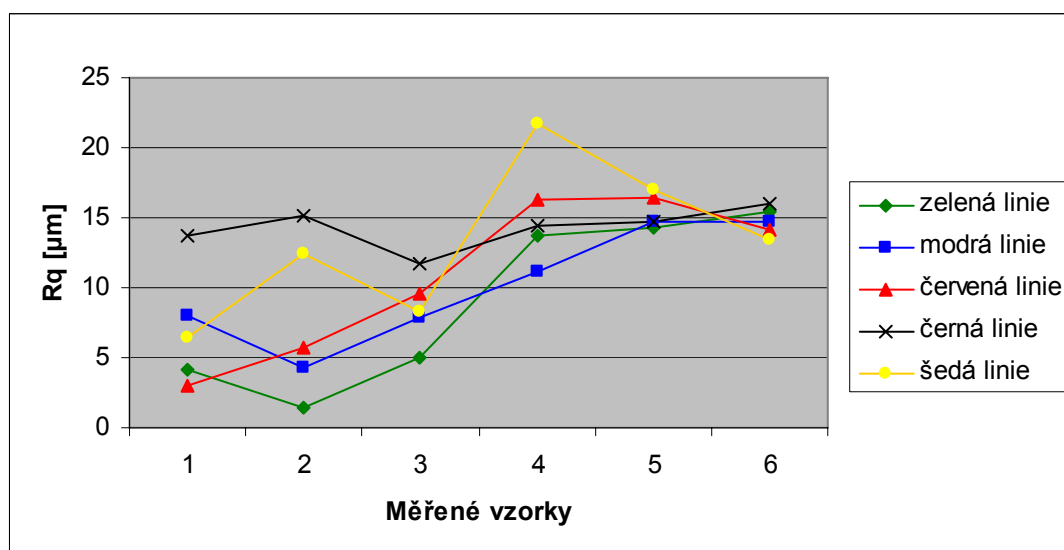
Tab. 5.6 2-D standardní parametry získané **pro šedé měřicí linie** u jednotlivých vzorků

Měřený vzorek	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Ra/Rz
1 - S1	5,201	6,364	12,113	0,429
2 - S2	9,73	12,457	25,449	0,382
3 - N2	6,42	8,344	17,813	0,360
4 - N3	15,741	21,716	27,115	0,581
5 - N2 opal	12,763	17,017	37,173	0,343
6 - N3 opal	10,103	13,451	24,853	0,407

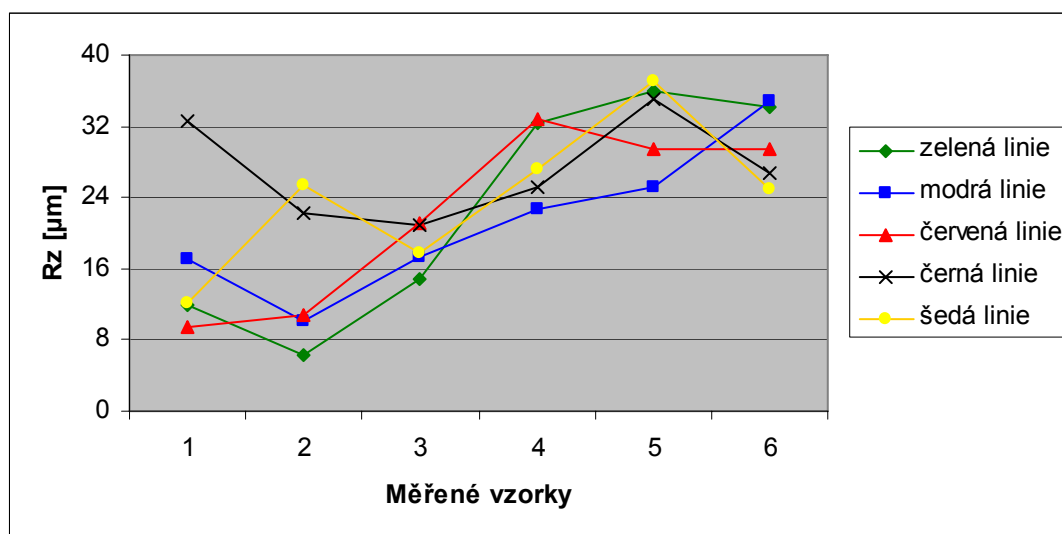
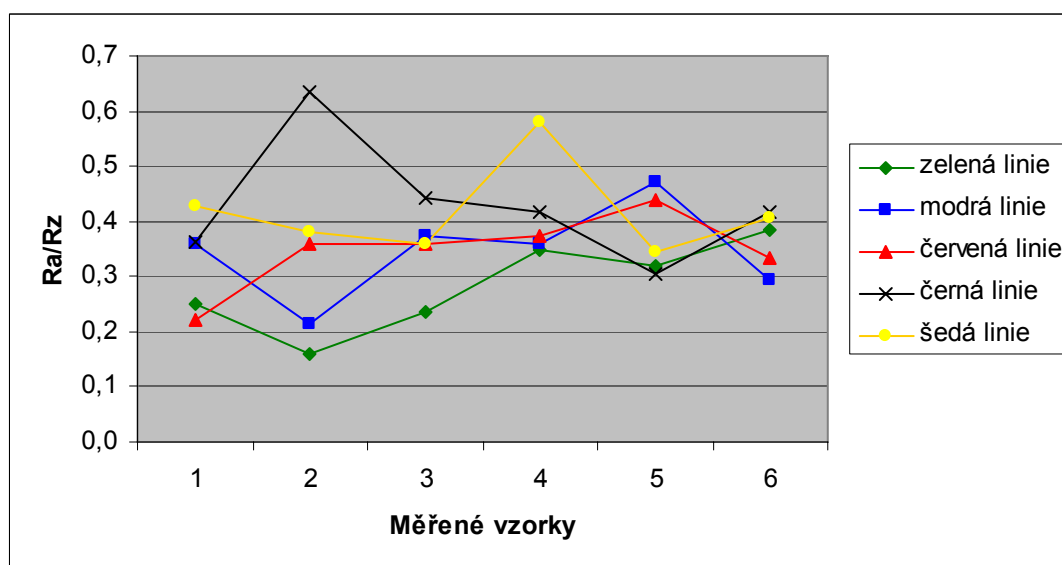
Závislosti jednotlivých parametrů textury povrchu na měřicích liniích (obr. 5.10 – 5.13).



Obr. 5.10 Závislost střední aritmetické odchylky profilu Ra k měřeným vzorkům pro dané linie



Obr. 5.11 Závislost střední kvadratické odchylky profilu Rq k měřeným vzorkům pro dané linie

Obr. 5.12 Závislost největší výšky nerovnosti R_z k měřeným vzorkům pro dané linieObr. 5.13 Závislost poměru R_a/R_z k měřeným vzorkům pro dané linie

5.3.2 Komparace 2D a 3D parametrů topografie povrchu

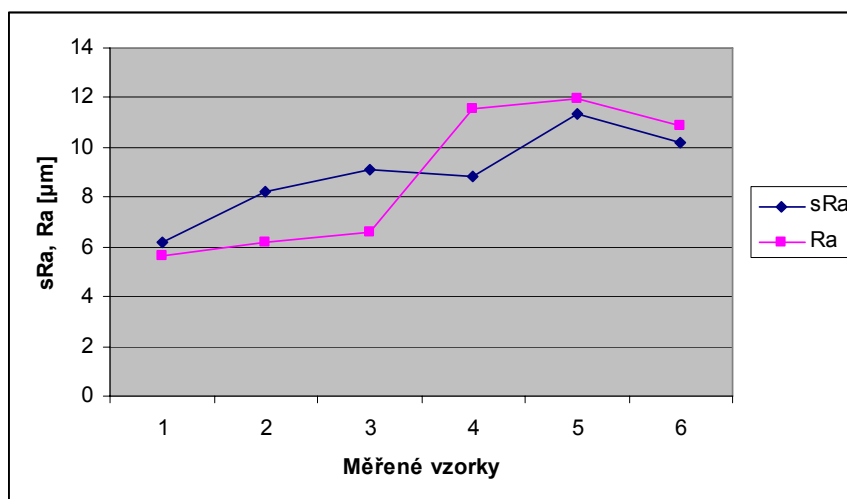
Trojrozměrné parametry hodnotí celý měřený povrch a dvourozměrné parametry hodnotí pouze měřicí linie na měřeném povrchu, což znamená, že 3D hodnoty jsou komplexnější a objektivnější než 2D. Dosud neexistuje mezinárodně uznávaný standard pro 3D hodnocení povrchu. Proto přebíráme 3D parametry z anglické terminologie, kterou

má definovanou Mark III: pro dvourozměrnou 2D profilometrii je popsáno 57 různých parametrů a 14 parametrů pro trojrozměrnou 3D profilometrii.

Srovnání 2D a 3D parametrů je uvedeno v tab. 5.7 – 5.9 s grafickým vyjádřením na obr. 5.14 – 5.16.

Tab. 5.7 Srovnání 3D a 2D průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu Ra

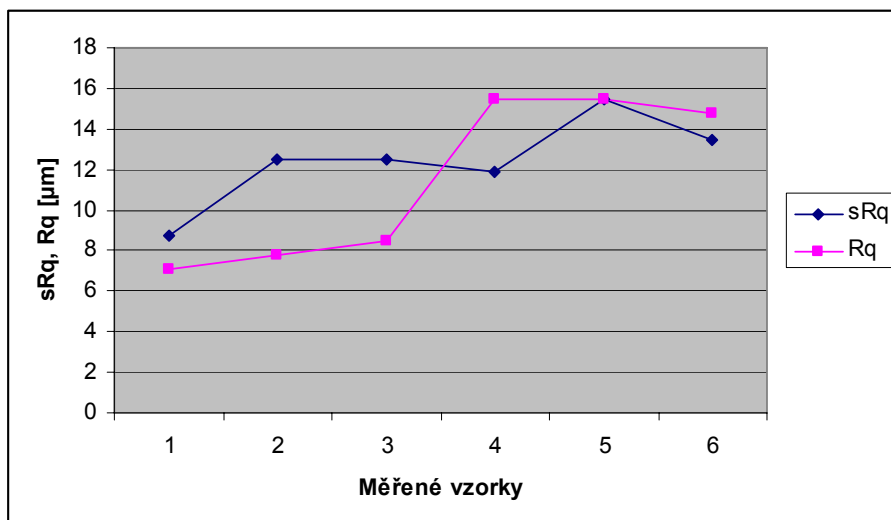
Měřený vzorek	sRa [μm]	Ra [μm]
1 - S1	6,194	5,656
2 - S2	8,192	6,18
3 - N2	9,081	6,613
4 - N3	8,868	11,575
5 - N2 opal	11,346	11,947
6 - N3 opal	10,194	10,905



Obr. 5. 14 Srovnání plošné střední aritmetické odchylka sRa a střední aritmetické odchylky Ra v závislosti na měřených vzorcích

Tab. 5.8 Srovnání 3D a 2D průměrné kvadratické úchylky posuzovaného profilu Rq

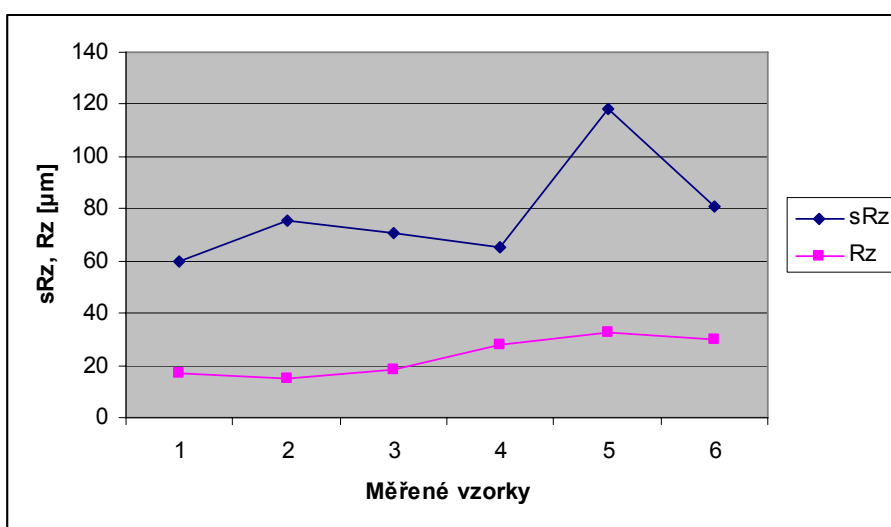
Měřený vzorek	sRq [μm]	Rq [μm]
1 - S1	8,696	7,038
2 - S2	12,529	7,809
3 - N2	12,537	8,505
4 - N3	11,85	15,450
5 - N2 opal	15,459	15,445
6 - N3 opal	13,454	14,725



Obr. 5.15 Srovnání plošné střední kvadratické odchylky topografie povrchu sRq a střední kvadratické odchylky topografie povrchu Rq v závislosti na měřených vzorkách

Tab. 5.9 Srovnání 3D a 2D největší výšky profilu Rz

Měřený vzorek	sRz [μm]	Rz [μm]
1- S1	60,004	16,670
2 - S2	75,601	14,998
3 - N2	70,445	18,353
4 - N3	65,349	28,019
5 - N2 opal	118,296	32,542
6 - N3 opal	80,893	30,047



Obr. 5. 16 Srovnání plošné největší výšky nerovnosti topografie povrchu sRz a největší výšky nerovnosti topografie povrchu Rz v závislosti na měřených vzorkách

5.3.3 Diskuze výsledků pro hranu

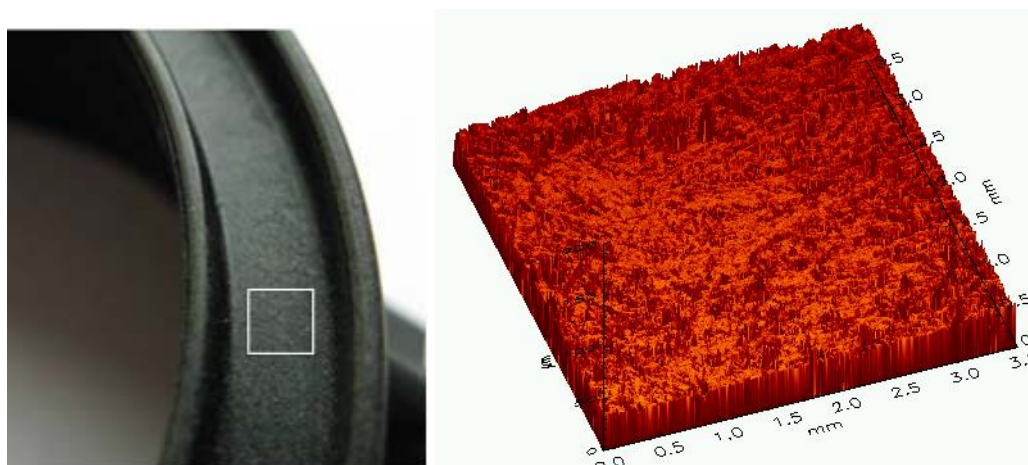
Pro porovnání z naměřených dat z jednotlivých hran budeme brát parametry R_a , R_q a R_z . Z naměřených ploch vychází tedy průměrné hodnoty R_a u staré formy S: $R_a = 5,918 \mu\text{m}$, $R_q = 7,423 \mu\text{m}$, $R_z = 15,834 \mu\text{m}$, u nové formy N: $R_a = 9,094 \mu\text{m}$, $R_q = 11,977 \mu\text{m}$, $R_z = 23,186 \mu\text{m}$ a u nové s opalem Nopal: $R_a = 11,426 \mu\text{m}$, $R_q = 15,085 \mu\text{m}$, $R_z = 31,295 \mu\text{m}$.

Jak je patrné u nové formy a následném opalu vzorků jsou všechny parametry vyšší než u staré i nové formy. Tudíž se domnívám, že opal sice hranu zdrsnil, ale nedošlo k opalu vnitřní plochy, což patrně nestačí pro zaručenou přilnavost plastu (PBT) a plexiskla pomocí lepidla. Proto byly po domluvě odstraněny hrany a měřeny vnitřní plochy.

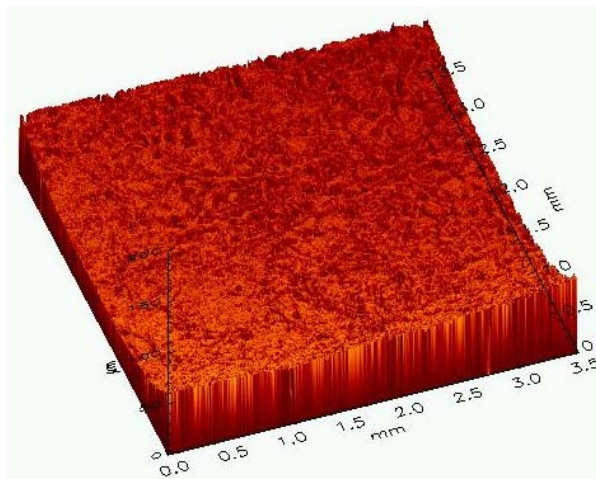
Na základě získaných dat z 2D a 3D měření jsem provedla kvalitativní i kvantitativní srovnání výsledků (tab. 5.7 – 5.9) za účelem zdůraznění diferencí vzniklých mezi parametry charakterizujícími topografii povrchu vytvořeného plastového výrobku.

5.3.4 Měření ploch

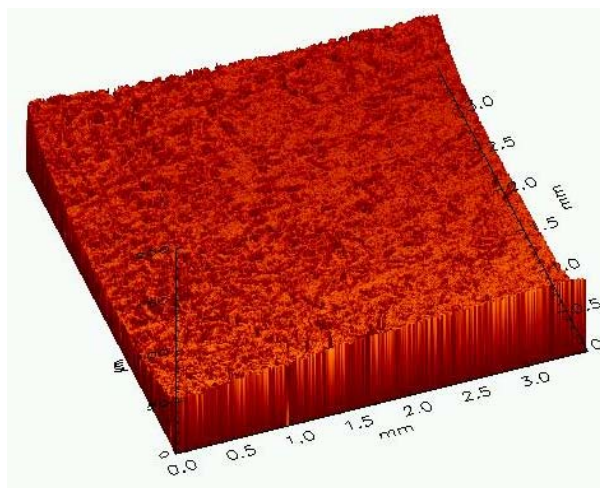
Byly měřeny čtvercové plochy $3,5 \times 3,5 \text{ mm}$, a to u vzorků označených S1, S2, N2, N3, N2opal a N3opal. Na obr. 5.17 jsou fotky a ukázky 3-D topografie povrchu.



a)



b)



c)

Obr. 5.17 Vybrané fotografie a digitální 3-D obrazy výlisků čtvercových ploch ze

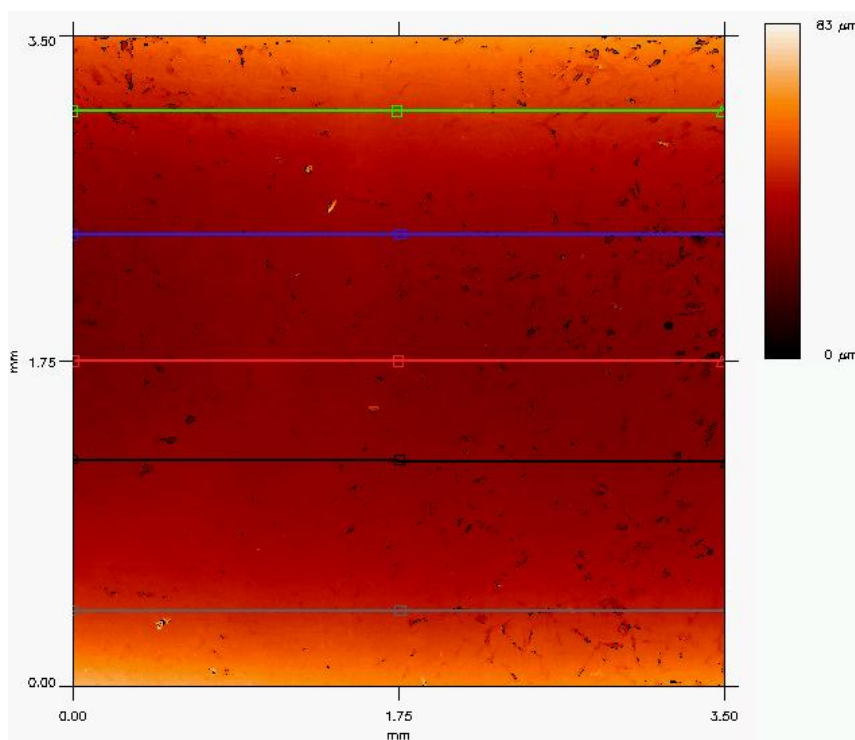
a) staré formy S2, b) nové formy N3, c) N3 s opalem.

Z těchto ploch byla vypočtena řada parametrů topografie, ale pro další analýzu byly vybrány tyto 3-D parametry, a to plošná střední aritmetická odchylka topografie povrchu sRa , plošná střední kvadratická odchylka topografie povrchu sRq a plošná největší výška nerovnosti topografie povrchu sRz . V tab. 5.10 je taktéž pro ilustraci proveden poměr sRa/sRz . Tyto 3-D parametry jsou z celé čtvercové plochy 3,5 x 3,5 mm.

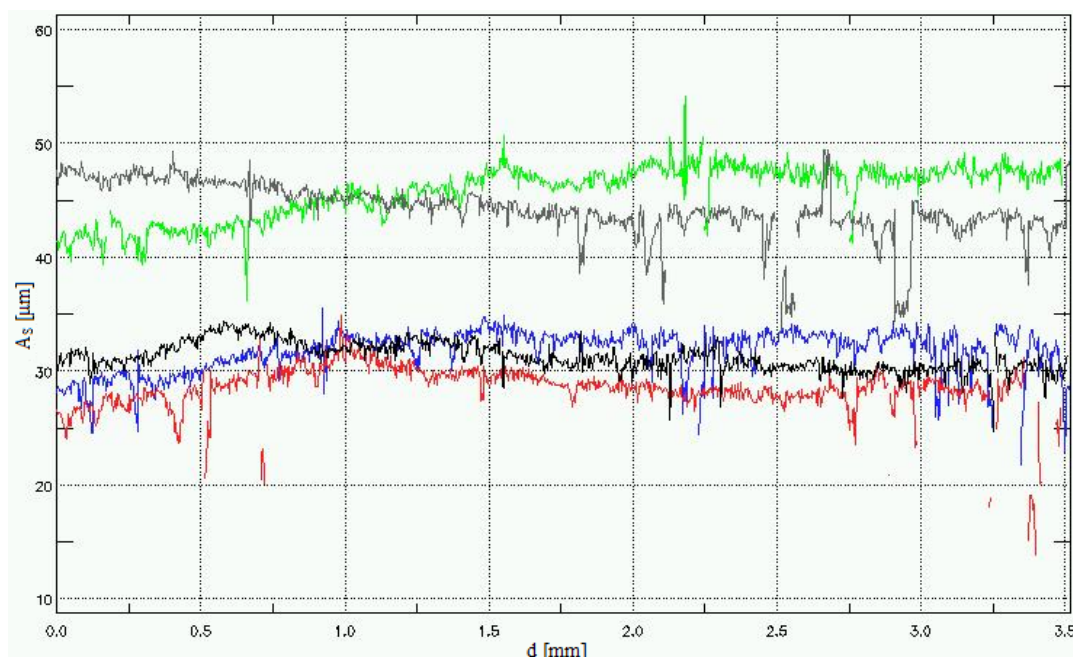
Tab. 5.10 Parametry 3-D topografie povrchu z čtvercových ploch

Měřený vzorek	sRa [μm]	sRq [μm]	sRz [μm]	sRa/aRz
1 - S1	6,194	8,696	60,004	0,103
2 - S2	8,192	12,529	75,601	0,108
3 - N2	9,081	12,537	70,445	0,129
4 - N3	8,868	11,85	65,349	0,136
5 - N2 opal	11,346	15,459	118,296	0,096
6 - N3 opal	10,194	13,454	80,893	0,126

Pro další výpočty 2-D standardních parametrů byla z naměřených ploch 3,5 x 3,5 mm provedena projekce těchto ploch a vybráno pět měřicích linií (obr. 5.18) pro ukázkou. Z těchto měřicích linií byly získány 2-D standardní parametry, z nichž byly vybrány střední aritmetická odchylka profilu Ra , střední kvadratická odchylka profilu Rq a největší výška nerovnosti profilu Rz . Na obr. 5.19 jsou signály textury povrchu pro jednotlivé měřicí linie.



Obr. 5.18 Projekce 3D do 2D obrazu výlisku ze staré formy S2



Obr. 5.19 Signál získaný z daných linií
kde d je vzdálenost [mm] a A_s je výšková nerovnost [μm]

V tab. 5.11 – 5.15 jsou pro jednotlivé měřicí linie pro vzorky označené S1, S2, N2, N3, N2opal a N3opal (1-6) uvedeny 2-D standardní parametry z měřicích linií, které jsou dlouhé 3,5mm. Měřicí linie jsou provedeny z toho důvodu, že povrch není ve všech částech homogenní, a proto vykazuje v různých místech jistý rozptyl hodnot 2-D parametrů.

Tab. 5.11 2-D standardní parametry získané **pro zelené měřicí linie** u jednotlivých vzorků

Měřený vzorek	R_a [μm]	R_q [μm]	R_z [μm]	R_a/R_z
1 - S1	1,422	2,984	12,395	0,115
2 - S2	2,351	3,181	16,274	0,144
3 - N2	0,655	1,01	7,237	0,091
4 - N3	1,224	1,808	11,066	0,111
5 - N2 opal	0,95	1,363	7,021	0,135
6 - N3 opal	0,975	1,428	8,604	0,113

Tab. 5.12 2-D standardní parametry získané **pro modré měřicí linie** u jednotlivých vzorků

Měřený vzorek	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Ra/Rz
1 - S1	0,777	1,376	8,325	0,093
2 - S2	1,722	2,62	15,324	0,112
3 - N2	0,638	0,963	5,986	0,107
4 - N3	1,561	2,224	12,574	0,124
5 - N2 opal	0,736	1,199	7,114	0,103
6 - N3 opal	0,827	1,092	6,02	0,137

Tab. 5.13 2-D standardní parametry získané **pro červené měřické linie** u jednotlivých vzorků

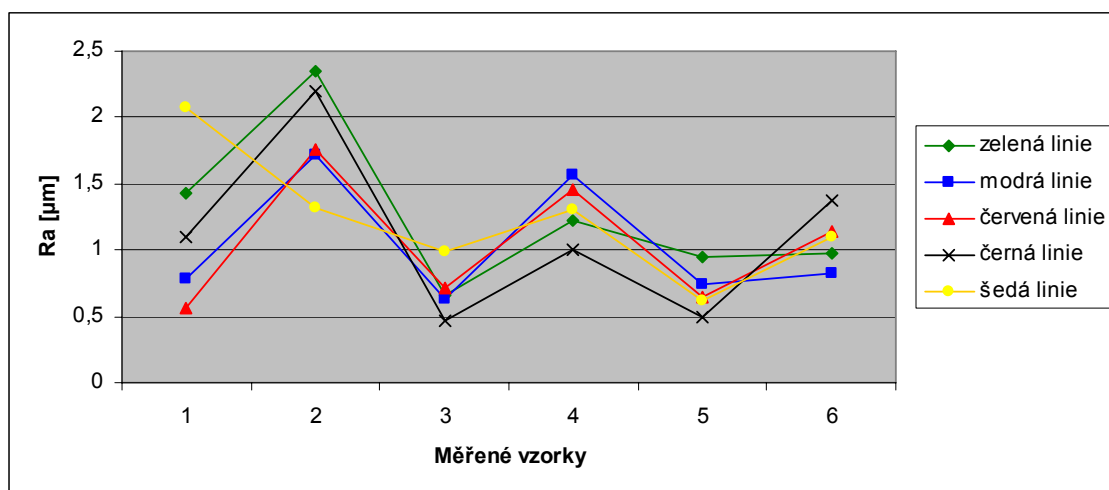
Měřený vzorek	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Ra/Rz
1 - S1	0,565	0,757	4,457	0,127
2 - S2	1,76	2,521	13,928	0,126
3 - N2	0,716	1,17	6,572	0,109
4 - N3	1,451	2,28	13,451	0,108
5 - N2 opal	0,647	0,952	6,368	0,102
6 - N3 opal	1,144	1,641	10,167	0,113

Tab. 5.14 2-D standardní parametry získané **pro černé měřicí linie** u jednotlivých vzorků

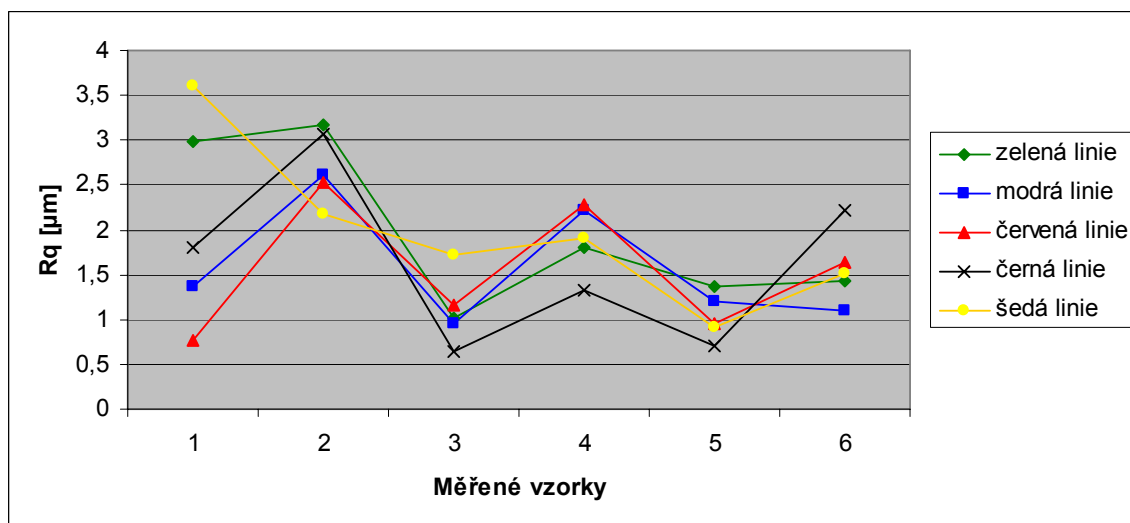
Měřený vzorek	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Ra/Rz
1 - S1	1,093	1,797	9,71	0,113
2 - S2	2,196	3,072	15,759	0,139
3 - N2	0,461	0,64	4,298	0,107
4 - N3	1,009	1,334	7,062	0,143
5 - N2 opal	0,488	0,708	4,425	0,110
6 - N3 opal	1,378	2,222	12,566	0,110

Tab. 5.15 2-D standardní parametry získané **pro šedé měřicí linie** u jednotlivých vzorků

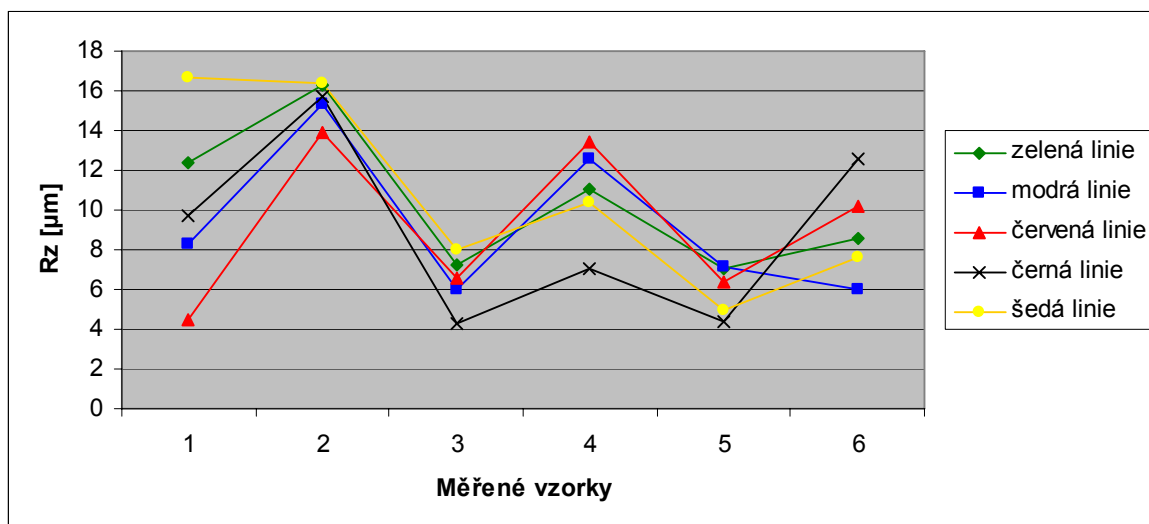
Měřený vzorek	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Ra/Rz
1 - S1	2,075	3,612	16,689	0,124
2 - S2	1,316	2,185	16,347	0,081
3 - N2	0,994	1,72	8,03	0,124
4 - N3	1,303	1,903	10,397	0,125
5 - N2 opal	0,62	0,906	4,915	0,126
6 - N3 opal	1,105	1,522	7,654	0,144



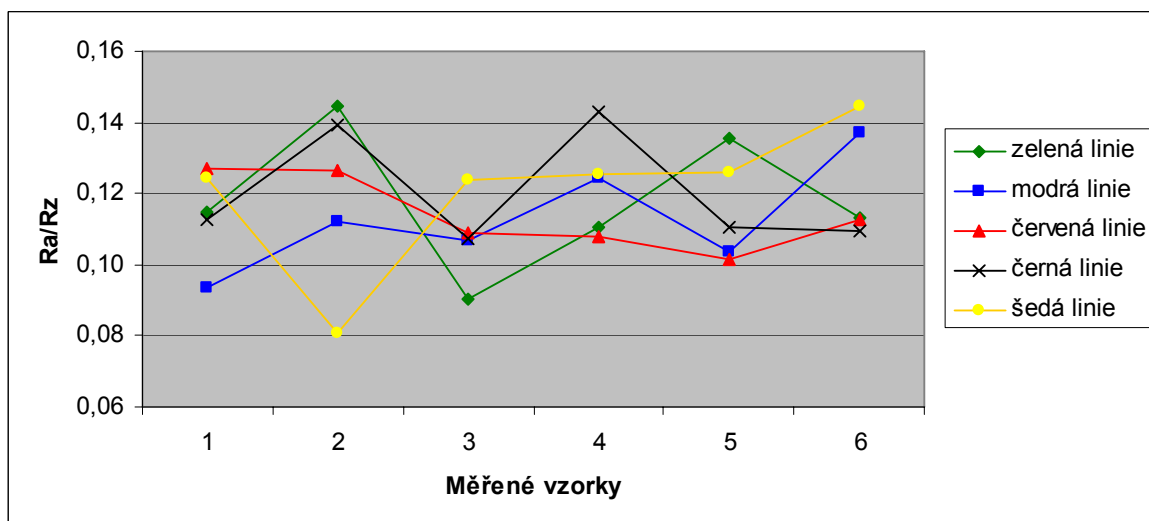
Obr. 5.20 Závislost střední aritmetické odchylky profilu R_a k měřeným vzorkům pro dané linie



Obr. 5.21 Závislost střední kvadratické odchylky profilu R_q k měřeným vzorkům pro dané linie



Obr. 5.22 Závislost největší výšky nerovnosti Rz k měřeným vzorkům pro dané linie

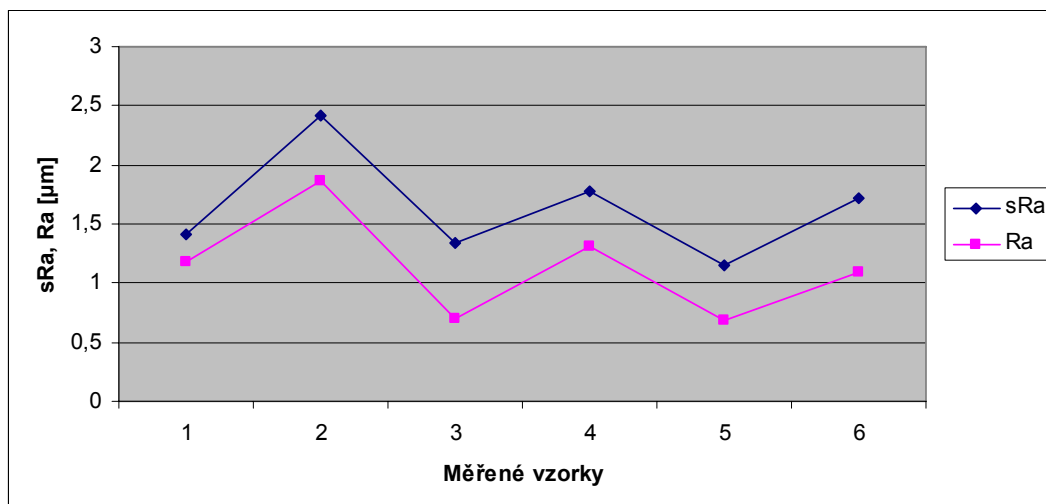


Obr. 5.23 Závislost poměru Ra/Rz k měřeným vzorkům pro dané linie

Srovnání 2D a 3D parametrů je uvedeno v tab. 5.16 – 5.18 s grafickým vyjádřením na obr. 5.24 – 5.26.

Tab. 5.16 Srovnání 3D a 2D průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu Ra

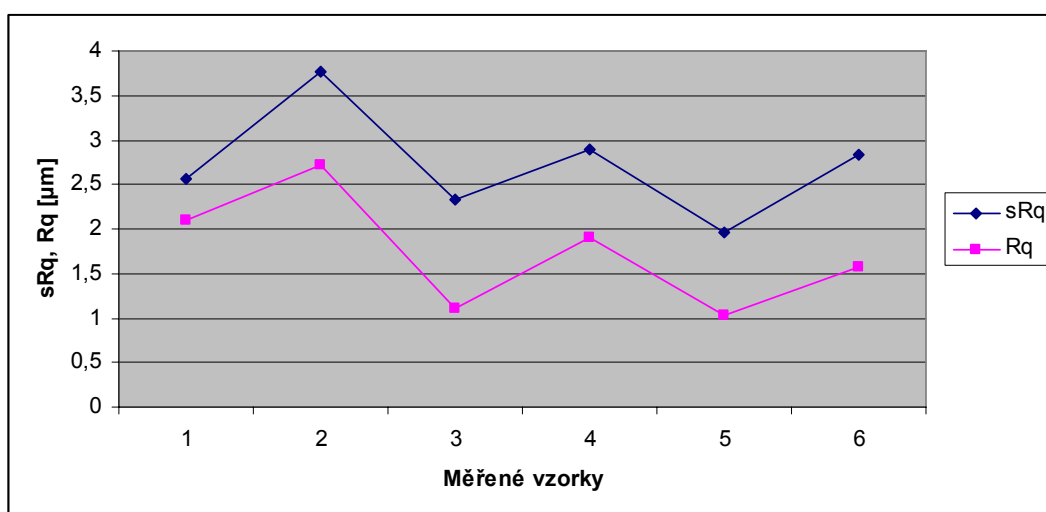
Měřený vzorek	sRa [μm]	Ra [μm]
1 - S1	1,412	1,186
2 - S2	2,42	1,869
3 - N2	1,335	0,693
4 - N3	1,774	1,31
5 - N2 opal	1,154	0,688
6 - N3 opal	1,722	1,086



Obr. 5.24 Srovnání plošné střední aritmetické odchylky sRa a střední aritmetické odchylky Ra v závislosti na měřených vzorcích

Tab. 5.17 Srovnání 3D a 2D průměrné kvadratické úchylky posuzovaného profilu Rq

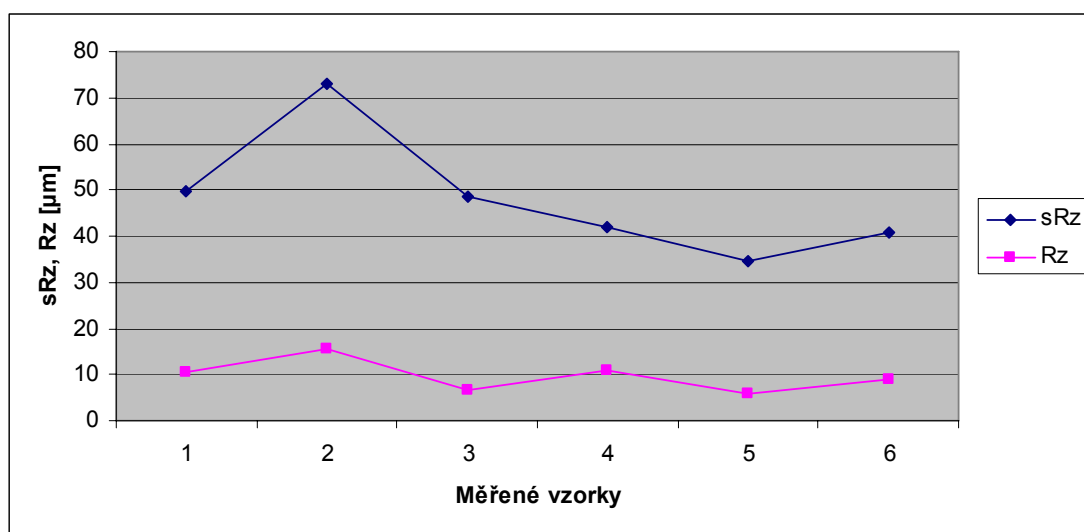
Měřený vzorek	sRq [μm]	Rq [μm]
1 - S1	2,571	2,105
2 - S2	3,758	2,716
3 - N2	2,326	1,101
4 - N3	2,897	1,910
5 - N2 opal	1,962	1,026
6 - N3 opal	2,826	1,581



Obr. 5.25 Srovnání plošné střední kvadratické odchylky topografie povrchu sRq a střední kvadratické odchylky topografie povrchu Rq v závislosti na měřených vzorcích

Tab. 5.18 Srovnání 3D a 2D největší výšky profilu Rz

Měřený vzorek	sRz [μm]	Rz [μm]
1 - S1	49,669	10,315
2 - S2	72,826	15,526
3 - N2	48,523	6,425
4 - N3	42,126	10,910
5 - N2 opal	34,406	5,969
6 - N3 opal	40,732	9,002



Obr. 5.26 Srovnání plošné největší výška nerovnosti topografie povrchu sRz a největší výška nerovnosti topografie povrchu Rz v závislosti na měřených vzorcích

5.3.5 Diskuze výsledků pro plochu

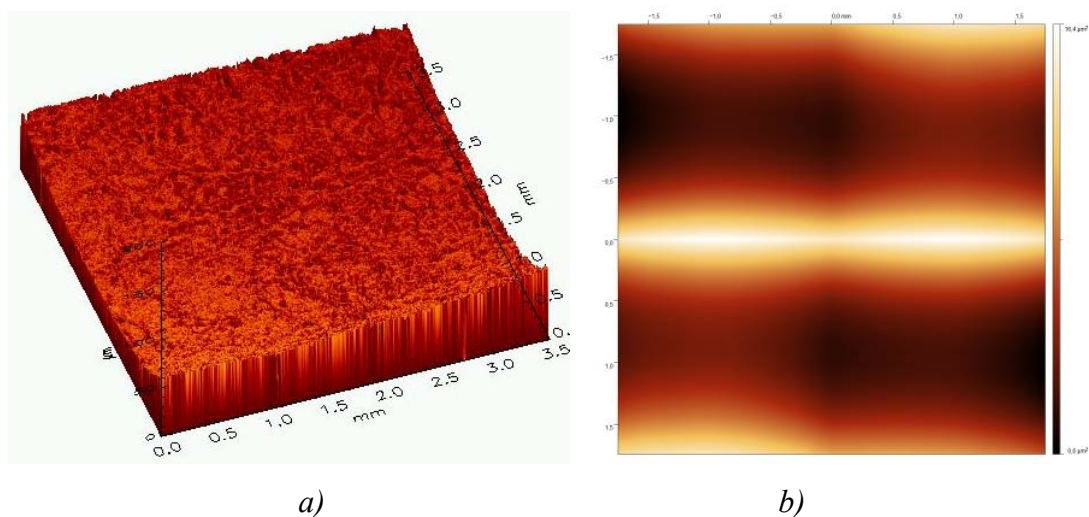
Pro porovnání z naměřených dat z jednotlivých čtvercových ploch budeme brát parametry Ra , Rq a Rz . Z naměřených čtvercových ploch vychází tedy průměrné hodnoty Ra u staré formy S: $Ra = 1,528 \mu\text{m}$, $Rq = 2,411 \mu\text{m}$, $Rz = 12,921 \mu\text{m}$, u nové formy N: $Ra = 1,001 \mu\text{m}$, $Rq = 1,505 \mu\text{m}$, $Rz = 8,667 \mu\text{m}$ a u nové s opalem Nopal: $Ra = 0,887 \mu\text{m}$, $Rq = 1,303 \mu\text{m}$, $Rz = 7,485 \mu\text{m}$.

Jak je patrné u staré formy např. parametr Ra je daleko vyšší než u nové formy. U posledních dvou hodnot, které jsou uvedeny pro novou formu, se domnívám, že u opalu nedošlo ke změně povrchových vlastností u analyzované čtvercové plochy, ale spíše opět u hran.

Na základě získaných dat z 2D a 3D měření jsem provedla kvalitativní i kvantitativní srovnání výsledků (tab. 5.16 – 5.18) za účelem zdůraznění diferencí vzniklých mezi parametry charakterizujícími topografii povrchu vytvořeného plastového výrobku.

5.4 Návrh metodiky měření a hodnocení topografie povrchů plastových výlisků

Optický profilometr MicroProf FRT (obr. 5.5), kterým byl měřen 3D povrch a následně z 2D povrchu byly získány signály výškových nerovností. Z 2D povrchu byly získány signály (obr. 5.27), z nichž byly určeny parametry Ra , Rq , Rz . Tímto způsobem můžeme vytvářet databanku naměřených hodnot a díky ní by bylo zjednodušeno hodnocení v praxi. Navrženou databanku by bylo vhodné doplnit o výsledky z autokorelačních funkcí povrchu vytvořených vzorků. Autokorelační funkce nám dá informaci o periodicitě nebo náhodnosti vytvořených povrchů.



Obr. 5.27 Schéma získání dat z MicroProf FRT [25]

a) 3D model povrchu, b) autokorelační funkce povrchu vzorku.

Závěr

Tato práce se zabývá hodnocením topografie povrchu plastů a měřicími metodami. Dále se zabývá výrobou plastů, a to vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním, rotačním natavováním a speciálními metodami. Věnuje se rozsáhlé experimentální činnosti související se získáváním dat, která umožňují analýzu a po interpretaci výsledků se zabývá stanovením nejvhodnější konfigurace získaných dat ve vztahu k technologickému procesu výroby plastů. Firma PF Plasty s.r.o. iniciovala tato rozsáhlá měření v důsledku častých reklamací odběratelů. Šlo zejména o problémy s přilnavostí plastu z materiálu PBT a plexiskla v závislosti na změně vstřikovací formy pro daný výrobek ve firmě.

V diplomové práci se nezabývám zkoumáním vlastností lepidla spojující plast PBT a plexisklo, protože to nebyl požadavek firmy. A to z toho důvodu, že firma pouze vyrábí dané výlisky a zákazník už si je sám slepuje. Proto jsem se zaměřila pouze na topografii povrchu a ne na adhezivní vlastnosti. Výrobky staré formy totiž odpovídaly požadavkům zákazníka.

Z hlediska lepší přilnavosti povrchové vrstvy je možné navrhnout několik variant, výlisky z nové formy zdrsnit opalem, zdrsnit stávající formu nebo vyrobit úplně novou formu s větší drsností. Pro komplexní a podrobnější predikci parametrů povrchové vrstvy by bylo dobré měřit průběžně povrchové vlastnosti forem i výlisků a tak si vytvořit jednoznačnou klasifikaci jednotlivých výrobků. V současné době se jeví jako optimální a nejlevnější řešení daného problému zdrsnit stávající formu.

Firma na základě výše uvedeného návrhu zdrsnila stávající formu na předkládaný parametr $Ra = 1,5 \mu\text{m}$ a tím odstranila problém s přilnavostí.

Použitá literatura

- [1] ARINO, I., et. al. *On the relation between surface texture and gloss of injection-molded pigmented plastics*. 2005. Článek Web of knowledge. [online]
- [2] BAZEL, T. L. *Process Optimization of plastic Injection Molding for Minimal Residual Stress*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. 1999.
- [3] SEOW, L.W.; LAM, Y.C. *Optimizing flow in plastic injection molding*. 1996. Článek Science Direct. [online]
- [4] NEUHÄUSL, Emil. *Požadavky na kvalitu a reálné možnosti technologie vstřikování*. MM Průmyslové spektrum. 2010/1. Trendy/Plasty. [citováno 3.února 2010] Dostupné z URL: < <http://www.mmspektrum.com/clanek/pozadavky-na-kvalitu-a-realne-moznosti-technologie-vstrikovani> >
- [5] ARGONA, a.s. *Krátce z historie* [online]. Boskovice. [citováno 26.dubna 2010]. Dostupné z URL: < <http://www.argona.cz/DataStorage/File/KR%C3%81TCE%20Z%20HISTORIE%20PLAST%C3%9A.pdf> >
- [6] D & M Plastics Inc. *The history of plastic Moulding* [online]. Leden 2009. [citováno 26.dubna 2010]. Dostupné z URL: < <http://www.plasticmoulding.ca/history.htm> >
- [7] STEIDL, Josef. *Plasty a kompozity naplňují materiálové požadavky moderního strojírenství* [online]. MM Průmyslové spektrum. 2005/1. Komerční příloha/Plasty. [citováno 3.května 2010] Dostupné z URL: < <http://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-a-kompozity-naplnuji-materialove-pozadavky-moderniho-strojirens> >
- [8] SOVA, Miloš; KREBS, Josef. *Termoplasty v praxi*. Praha: TYPOS, 2000. ISBN 80-86229-15-7.
- [9] The British Plastics Federation [online]. London. [citováno 22.března 2010] Dostupné z URL: <<http://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Polymers/Default.aspx>>
- [10] HLAVIČKA, Aleš; VEJRAŽKOVÁ, Ivana. *Plasty pro stavebnictví a architekturu 1 – Úvod do zpracování plastů* [online]. 18.1.2008. iMateriály [citováno 21.března 2010] Dostupné z URL:< <http://www.imaterialy.cz/clanky/materialy/1893/plasty-pro-stavebnictvi-a-nbsparchitekturu-1-uvod-do-zpracovani-plastu/> >

- [11] Arburg. *Uživatelská kompetence v technologii vstřikování – Důsledné využití inovačních technologií* [online]. Lossburg, 2007. [citováno 4.května 2010] Dostupné z URL: < www.arburg.com/com/common/download/Web_528390_CZ.pdf >
- [12] LENFELDT, Petr. *Technologie II* [online]. Technická univerzita v Liberci. [citováno 15.dubna 2010]. Dostupné z URL: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm>
- [13] BEROUN, Stanislav. *Úvod do strojírenství* [online]. Technická univerzita v Liberci. [citováno 21.března 2010] Dostupné z URL: < http://www.ksd.tul.cz/studenti/texty/uvod_do_strojirenstvi/UdS-5pr.pdf >
- [14] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. *Tvarování* [online]. [citováno 21.březen 2010] Dostupné z URL: < web.ft.utb.cz/cs/docs/6._Tvarov_n_.ppt >
- [15] CZ Plasty s.r.o. [online]. Pardubice. [citováno 3.května 2010] Dostupné z URL: < <http://www.czplast.cz> >
- [16] BUMBÁLEK, Leoš; BUMBÁLEK, Bohumil. *Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu* [online]. VUT Brno. [citováno 18.května 2010]. Dostupné z URL: < http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/44_Bumbalek_VUTBR.pdf >
- [17] VALÍČEK, Jan. Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu. Habilitační práce. Ostrava. 2008. s 115.
- [18] BUMBÁLEK, Bohumil; ODVODY, Vladimír; OŠŤÁDAL, Bohuslav. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989. 340 s. ISBN 04-252-89.
- [19] CHRISTOPH, Ralf; NEUMAN, Hans Joachim. *Multisensor Coordinate Metrology – Measurement of Form, Size, and Location in Production and Quality Control*. Munich, 2004.
- [20] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie část I*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2006. 112 s. ISBN 80-248-0671-1.
- [21] BÁTORA, Bohumil; VASILKO, Karol. *Obrobené povrchy: technologická dedičnosť, funkčnosť*. Trenčín : Trenčinská univerzita, 2000. 183 s. ISBN 80-88914-19-1.
- [22] VALÍČEK, Jan. *Snímání kvality povrchu materiálu pro řízení technologie kapalinového paprsku* : doktorská práce. Ostrava : VŠB-TUO, Institut fyziky, 2003, 92 s.

- [23] LIPTÁK, Ondrej; BÉKÉS, Ján et al. *Technológia výroby : obrábanie*. Bratislava: ALFA, 1979. 444 s. ISBN 63-565-79.
- [24] HALUZÍKOVÁ, Barbora. Měření topografie plastových výlisků ve firmě PF PLASTY CZ s.r.o. Bakalářská práce. Ostrava. 2008.
- [25] OHLÍDAL, Miloslav; PÁLENÍKOVÁ, Kateřina. *Možnosti optického profilometru MicroProf FRT při hodnocení kvality povrchu. Jemná mechanika a optika*. 2004, č. 9, s.251-259. ISBN 0447-6441.
- [26] KUSÁK, Ivo. *Konfokální mikroskopie* [online]. [citováno 11.května 2010]. Dostupné z URL: < http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni_mikroskopie.pdf >
- [27] URBÁNEK, Michal. *Magnetické vlastnosti ultratenkých vrstev a struktur* [online]. Zpravodaj ČVS 17 (2) 2009 [citováno 18.května 2010]. Dostupné z URL: < http://www.vakspol.cz/z2009/zpr09_2.pdf >. ISSN 1213-2705.
- [28] HOŠEK, Jan. *Přehled klasických a moderních mikroskopických metod* [online]. ČVUT Praha, 2008. [citováno 18.května 2010]. Dostupné z URL: < <http://www.fsid.cvut.cz/cz/U2102/hosek/clanky/Mikroskopie.pdf> >
- [29] PLÁŠEK, Jaromír. *Konfokální mikroskop* [online]. Přírodovědecký časopis Vesmír, 1995/9. [citováno 7.května 2010]. Dostupné z URL: < <http://www.vesmir.cz/clanek/konfokalni-mikroskop> >. ISSN 1214-4029.
- [30] ŠVEJCAR, Jiří. *Moderní metody strukturní analýzy pro průmyslovou praxi*. Sborník 130 let – VÍTKOVICE Zkušebny a laboratoře, spol. s.r.o. Ostrava 2003
- [31] JANDA, Pavel. Moderní mikroskopické techniky - Elektronová mikroskopie a mikroskopie rastrovací sondou [online]. AVČR Praha. [citováno 13.května 2010]. Dostupné z URL: < http://www.jh-inst.cas.cz/www/data/seminar/soubor/lecture-SPM_Net.pdf >
- [32] SLÁDEK, Petr. *O mikroskopech* [online]. Masarykova univerzita v Brně. 2006 [citováno 18.května 2010]. Dostupné z URL: < <http://svp.muni.cz/ukazat.php?docId=39> >
- [33] NIKON. *Základní metody světelné mikroskopie* [online]. Brno, 2004. [citováno 18.května 2010]. Dostupné z URL: < http://www.are.cz/documents/ZAKLADNI_METODY_SVETELNE_MIKROSKOPIE.pdf >

- [34] PIRKL, Slavomír. *Moderní mikroskopické metody* [online]. Univerzita Pardubice, 2003. [citováno 4.května 2010].
Dostupné z URL: < kf.upce.cz/Mod_mikr_metody_4.doc >
- [35] KUBÍNEK, Roman; PŮLKRÁBEK, Josef. *Moderní mikroskopické techniky* [online]. [citováno 15.května 2010].
Dostupné z URL: < <http://exfyz.upol.cz/didaktika/oprlz/mmm.pdf> >
- [36] MACHALA, L., et. al. *Mikroskopie skenující sondou* [online]. Univerzita Palackého Olomouc, 2003. [citováno 4.května 2010]
Dostupné z URL: < <http://atmilab.upol.cz/mss> >
- [37] ŠOLTÝS, Ján; MARTAUS, Jozef. *Výskum povrchov metódou atómovej silovej mikroskopie* [online]. [citováno 15.května 2010].
Dostupné z URL: < <http://www.elu.sav.sk/vcite/soltys.pdf> >
- [38] BŘEŇ, David; KULHÁNEK, Petr. *Pikoškály aneb jak uvidět atom* [online], Aldebaran bulletin. 2004/27 [citováno 4.května 2010].
Dostupné z URL: < http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_27_pic.html >
- [39] ČSN EN ISO 4287 : 1999
- [40] ČSN EN ISO 4288 : 1999
- [41] INVERA s.r.o. [online]. Rakovník. [citováno 23.dubna 2010]. Dostupné z URL:
< <http://www.invera.cz/index.php?lang=cs&id=vstrik-stroje-invera> >
- [42] Dowell Materiále [online], 2006.
Dostupné z URL: < <http://www.dowell.com.hk/whatisPBT.htm> >
- [43] SNĚHOTA, Rudolf., et al. *Zpracování plastických hmot*. Interní materiály firmy PF PLASTY CZ s.r.o. 2008. 27 s.
- [44] Main Mould [online]. [citováno 3.května 2010].
Dostupné z URL: < <http://main-mould.com/download> >
- [45] HEINTZE, S.D., et. al. *A comparison of three different methods for the quantification of the in vitro wear of dental materiále*. 2006. Článek Science Direct [online]